

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
21. November 2002 (21.11.2002)

PCT

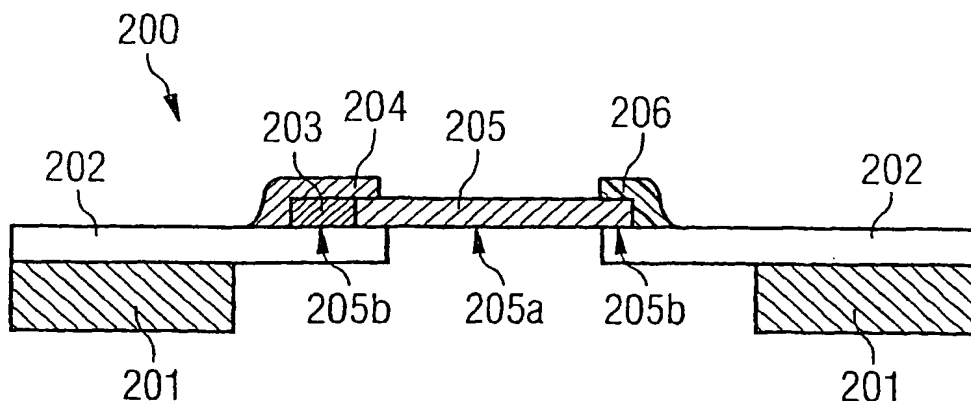
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 02/092505 A2**

- (51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: **C01B 31/02** (72) Erfinder; und  
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **GRAHAM, Andrew** [GB/DE]; Gufidauner Strasse 6, 81547 München (DE).  
(21) Internationales Aktenzeichen: **PCT/EP02/05433** **HOFMANN, Franz** [DE/DE]; Herbergstrasse 25B, 80995 München (DE). **KRETZ, Johannes** [DE/DE]; Tattenbachstrasse 1, 80538 München (DE). **KREUPL, Franz** [DE/DE]; Mandlstrasse 24, 80802 München (DE). **LUYKEN, Richard, Johannes** [DE/DE]; Böcklerweg 28, 81825 München (DE). **RÖSNER, Wolfgang** [DE/DE]; Sudetenstrasse 23, 85521 Ottobrunn (DE).  
(22) Internationales Anmeldedatum: 16. Mai 2002 (16.05.2002)  
(25) Einreichungssprache: Deutsch  
(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch  
(30) Angaben zur Priorität: 101 23 876.2 16. Mai 2001 (16.05.2001) DE (74) Anwalt: **VIERING, JENTSCHURA & PARTNER**; Steindorfstrasse 6, 80538 München (DE).  
(81) Bestimmungsstaaten (national): JP, US.  
(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **INFINEON TECHNOLOGIES AG** [DE/DE]; St.-Martin-Strasse 53, 81669 München (DE). (84) Bestimmungsstaaten (regional): europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: NANOTUBE ARRAY AND METHOD FOR PRODUCING A NANOTUBE ARRAY

(54) Bezeichnung: NANORÖHREN-ANORDNUNG UND VERFAHREN ZUM HERSTELLEN EINER NANORÖHREN-ANORDNUNG



(57) Abstract: The invention relates to a nanotube array, comprising a substrate, a catalyst layer having one or more partial areas on the surface of the substrate and at least one nanotube parallel to the surface of the substrate on the surface of the catalyst layer. The nanotube array also has an electrically insulating layer between the substrate and the nanotubes and a topography such that the end segments of the at least one nanotube rest on the electrically insulating layer while its central segment rests freely. The invention also relates to a method for the production of said nanotube array.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Nanoröhren-Anordnung mit einem Substrat, einer Katalysatorschicht, die einen oder mehrere Teilbereiche aufweist, auf der Oberfläche des Substrats sowie mindestens einer parallel zur Oberfläche des Substrats auf der Oberfläche der Katalysatorschicht angeordneten Nanoröhre. Die Nanoröhren-Anordnung weist ferner eine elektrisch isolierende Schicht zwischen dem Substrat und den Nanoröhren mit einer derartigen Topographie auf, dass die mindestens eine Nanoröhre in ihren Endabschnitten auf der elektrisch isolierenden Schicht aufliegt und in ihren Mittenabschnitt frei liegt. Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung.

WO 02/092505 A2



**Veröffentlicht:**

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

*Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.*

## Beschreibung

### Nanoröhren-Anordnung und Verfahren zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung

5

Die Erfindung betrifft eine Nanoröhren-Anordnung und ein Verfahren zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung.

10

Die herkömmliche Silizium-Mikroelektronik wird bei weiter voranschreitender Verkleinerung an ihre Grenzen stoßen.

Insbesondere die Entwicklung zunehmend kleinerer und dichter angeordneter Transistoren von mittlerweile mehreren Hundertmillionen Transistoren pro Chip wird in den nächsten zehn Jahren prinzipiellen physikalischen Problemen und

15

Begrenzungen ausgesetzt sein. Wenn Strukturabmessungen von 80 nm unterschritten werden, werden die Bauelemente durch Quanteneffekte störend beeinflusst und unterhalb von Dimensionen von etwa 30 nm dominiert. Auch führt die zunehmende Integrationsdichte der Bauelemente auf einem Chip zu einem dramatischen Anstieg der Abwärme.

20

Als eine mögliche Nachfolgetechnik der herkömmlichen Halbleiterelektronik sind Kohlenstoffnanoröhren bekannt. Eine Übersicht über diese Technologie gibt beispielsweise [1].

25

Eine Nanoröhre ist eine einwandige oder mehrwandige, röhrenartiger Kohlenstoff-Verbindung. Bei mehrwandigen Nanoröhren ist mindestens eine innere Nanoröhre von einer äußeren Nanoröhre coaxial umgeben. Einwandige Nanoröhren weisen typisch Durchmesser von ungefähr einem Nanometer auf, die Länge einer Nanoröhre kann mehrere hundert Nanometer betragen. Die Enden einer Nanoröhre sind häufig mit jeweils einem halben Fulleren-Molekülteil abgeschlossen.

30

35

Das ausgedehnte  $\pi$ -Elektronensystem und die geometrische Struktur von Nanoröhren bewirken eine gute elektrische Leitfähigkeit, weshalb Nanoröhren geeignet für den Aufbau von

Schaltkreisen mit Dimensionen im Nanometer-Bereich sind. Aus [2] ist bekannt, dass die elektrische Leitfähigkeit von Kohlenstoffnanoröhren die von Metallen gleicher Abmessung deutlich übersteigen kann.

5

Der Durchmesser und die Chiralität einer Nanoröhre sind Parameter, von denen die elektrische Leitfähigkeit einer Nanoröhre abhängt. Die elektrische Leitfähigkeit einer Nanoröhre kann ferner durch Anlegen eines elektrischen Feldes und/oder Dotieren der Nanoröhren mit Bornitrid verändert werden. Im letzteren Falle spricht man von einer mit Boratomen und Stickstoffatomen dotierten Nanoröhre oder auch von einer Bornitrid-Nanoröhre.

10

15 Aufgrund der Leitfähigkeit von Nanoröhren sowie aufgrund der Einstellbarkeit dieser Leitfähigkeit in der oben genannten Weise eignen sich Nanoröhren für eine große Anzahl von Anwendungen, beispielsweise für die elektrische Verbindungstechnik in integrierten Schaltkreisen, für Bauelemente in der Mikroelektronik sowie für Elektronen-Emitter.

20

Ferner ist aus [3] bekannt, dass der elektrische Widerstand von Nanoröhren sich innerhalb weniger Sekunden um ungefähr drei Größenordnungen ändert, wenn Nanoröhren einem Gas wie beispielsweise einem Stickstoffdioxidgas ( $\text{NO}_2$ ) oder einem Ammoniakgas ( $\text{NH}_3$ ) ausgesetzt werden. In einer  $\text{NH}_3$ -Atmosphäre wird die elektrische Leitfähigkeit der Nanoröhren herabgesetzt, was mit einer Verschiebung der Valenzbandkante weit unter das Fermi-niveau der Nanoröhren und einer hierdurch bewirkten Verarmung von Ladungsträgern erklärt wird. Umgekehrt erhöht sich die elektrische Leitfähigkeit der Nanoröhren um etwa drei Größenordnungen, wenn die Nanoröhren einer  $\text{NO}_2$ -Atmosphäre in einer Konzentration von etwa 200 ppm ausgesetzt werden. Dies wird damit erklärt, dass die Fermienergie der Nanoröhren näher an das Valenzband

30

35

verschoben wird und demzufolge die Zahl der Ladungsträger in den Nanoröhren zunimmt.

Für die Verwendung von Nanoröhren in der Mikroelektronik ist es oftmals wünschenswert, Nanoröhren an bestimmte Orte eines Substrats definiert aufzubringen. Beispielsweise können Nanoröhren als Leiter verwendet werden, um zwei voneinander elektrisch getrennte Leiterebenen eines Mikroschaltungselements zu koppeln. Hierfür ist erforderlich, dass Nanoröhren nur dort aufgewachsen werden, wo eine entsprechende elektrische Kopplung angestrebt wird, wohingegen die anderen Bereiche des Substrates frei von Nanoröhren bleiben sollen, um elektrische Kurzschlüsse zu vermeiden.

Um dieses Ziel zu erreichen, ist bekannt, ein das Wachstum von Nanoröhren katalysierendes Metall, beispielsweise Eisen, mit Hilfe eines Sputterverfahrens auf ein etwa mit Photolack strukturiertes Substrat aufzubringen. Anschließend wird unter Verwendung eines Lift-off-Verfahrens der strukturierte Photolack und das darauf befindliche Metall entfernt. Dadurch bleibt das Metall-Material nur auf zuvor freigelegten Stellen des Substrats zurück. Das zurückbleibende katalytisch aktive Metall wird als Matrix zum Aufwachsen von Nanoröhren verwendet.

Abscheideverfahren aus der Gasphase („chemical vapour deposition“, CVD) sind als Herstellungsverfahren für Kohlenstoffnanoröhren bekannt. Bei dem CVD-Verfahren werden die Komponenten und Dotierungsstoffe als Gase, gegebenenfalls mit zusätzlichen Trägergasen in einem Reaktionsraum zusammengeführt, und dort erfolgt die Abscheidung auf dem Substrat. Für die Herstellung von Kohlenstoffnanoröhren wird beim CVD-Verfahren häufig Methan ( $\text{CH}_4$ ) oder alternativ Azetylen ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) als Kohlenstoffquelle verwendet.

Verfahren zum Herstellen von Nanoröhren sowie Nanodrähten auf katalytisch aktiven Oberflächen unter Verwendung des CVD-Verfahrens sind beispielsweise in [4] und [5] beschrieben. Mit dem dort angegebenen Verfahren lassen sich

- 5 Kohlenstoffnanoröhren herstellen, die senkrecht auf einem Substrat stehend angeordnet sind.

Bei dem in [4] beschriebenen Verfahren muss die Unterlage allerdings aus Aluminium bestehen. Diese Materialbeschränkung  
10 ist nachteilhaft. Ferner ergeben sich gemäß dem in [4] beschriebenen Verfahren relativ große, mehrwandige Kohlenstoffnanoröhren mit Durchmessern von ungefähr 50 nm. Auch sind die gemäß dem beschriebenen Verfahren hergestellten Kohlenstoffnanoröhren senkrecht zu dem Substrat orientiert  
15 und daher nur eingeschränkt in herkömmliche Silizium-Mikroelektronik integrierbar.

Gemäß dem in [5] beschriebenen Verfahren zum Herstellen von Kohlenstoffnanoröhren entsteht eine Anordnung von  
20 Kohlenstoffnanoröhren in dicht gepackten Blöcken. Diese Blöcke werden durch den mit einer Maske aufgedampften Katalysator (beispielsweise Eisen) definiert. Jedoch ist das Herstellen einer regelmäßigen Anordnung gemäß dem beschriebenen Herstellungsverfahren schwierig. Da wiederum  
25 ausschließlich senkrecht zu der Oberfläche des Substrats orientierte Nanoröhren herstellbar sind, sind der Ankopplung der Nanoröhren an herkömmliche Silizium-Mikroelektronik enge Grenzen gesetzt.

30 Zusammenfassend weisen aus dem Stand der Technik bekannte Herstellungsverfahren einer Anordnung von Kohlenstoffnanoröhren eine Reihe von Nachteilen auf. So sind die gemäß den beschriebenen Verfahren hergestellten Nanoröhren senkrecht zu der Oberfläche des Substrats  
35 orientiert. Ferner ist es gemäß den bekannten Verfahren schwierig, strukturell definierte Anordnungen von Nanoröhren herzustellen. Den Nanoröhren auf der Oberfläche eines

Katalysatormaterials ist keine exakt definierte Aufwuchsrichtung vorgegeben. Der daraus resultierende geringe Ordnungsgrad und die Tatsache, dass die Nanoröhren senkrecht zur Substratoberfläche orientiert sind, führt dazu, dass die  
5 aus dem Stand der Technik bekannten Nanoröhren-Anordnungen nur unter Schwierigkeiten oder gar nicht an herkömmliche Silizium-Mikroelektronik ankoppelbar ist.

Aus [6] ist bekannt, auf einem Substrat Katalysatorinseln  
10 auszubilden. Unter Verwendung eines CVD-Verfahrens kann eine mit zwei Katalysatorinseln gekoppelte Kohlenstoffnanoröhre ausgebildet werden, falls eine ausgehend von einer Katalysatorinsel aufwachsende Kohlenstoffnanoröhre zufällig in Richtung einer zweiten Katalysatorinsel aufwächst. Daher  
15 ist auch gemäß [6] keine räumlich ausreichend gut definierte Anordnung von Nanoröhren herstellbar.

Der Erfindung liegt das Problem zugrunde, eine räumlich gut definierte Anordnung planar orientierter Nanoröhren  
20 bereitzustellen.

Das Problem wird durch eine Nanoröhren-Anordnung und ein Verfahren zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung mit den Merkmalen gemäß den unabhängigen Patentansprüchen gelöst.

25 Eine Nanoröhren-Anordnung weist auf ein Substrat, eine Katalysatorschicht, die einen oder mehrere Teilbereiche aufweist, auf der Oberfläche des Substrats und mindestens eine parallel zur Oberfläche des Substrats auf der Oberfläche  
30 der Katalysatorschicht angeordnete Nanoröhre.

Indem die mindestens eine Nanoröhre parallel zur Oberfläche des Substrats angeordnet ist, ist eine planare Anordnung mindestens einer Nanoröhre realisiert. Daher ist die  
35 Nanoröhren-Anordnung der Erfindung geeignet zum Ankoppeln an herkömmliche Silizium-Mikroelektronik. Daher ist erfindungsgemäß eine elektronische Ankopplung einer

Nanoröhren-Anordnung an eine makroskopische Halbleiterelektronik ermöglicht.

5      Ferner kann die erfindungsgemäße Nanoröhren-Anordnung eine elektrisch isolierende Schicht zwischen dem Substrat und der Katalysatorschicht aufweisen. Diese elektrisch isolierende Schicht weist vorzugsweise eine derartige Topographie auf, dass die mindestens eine Nanoröhre in ihren Endabschnitten auf der elektrisch isolierenden Schicht aufliegt und in ihrem  
10      Mittenabschnitt freiliegt.

Indem die Oberfläche der mindestens einen Nanoröhre teilweise freiliegt, kann die freiliegende Oberfläche der Nanoröhre als aktive Sensoroberfläche verwendet werden. Beispielsweise kann  
15      die freiliegende Oberfläche der Nanoröhre in Wirkkontakt mit einer die Nanoröhren-Anordnung umgebenden Atmosphäre gelangen. Wie oben ausgeführt, ändert sich in der Anwesenheit bestimmter Gase (beispielsweise  $\text{NO}_2$  oder  $\text{NH}_3$ ) der elektrische Widerstand einer Nanoröhre signifikant, so dass infolge des  
20      Freiliegens der Nanoröhre die Nanoröhren-Anordnung in vielen Anwendungen in der Sensorik eingesetzt werden kann.

Ferner können bei der Nanoröhren-Anordnung die Teilbereiche der Katalysatorschicht voneinander elektrisch entkoppelt  
25      sein. Auch können unabhängig davon die Nanoröhren der Anordnung voneinander elektrisch entkoppelt sein.

Indem die Nanoröhren-Anordnung mehrere voneinander elektrisch entkoppelte Teilbereiche der Katalysatorschicht bzw. mehrere  
30      voneinander elektrisch entkoppelte Nanoröhren aufweist, ist es möglich, mehrere Nanoröhren parallel und unabhängig voneinander als Bauelemente für einen elektrischen Schaltkreis (beispielsweise als elektrische Leiter) und/oder als Sensoren zu verwenden.

35      Die voneinander entkoppelten Nanoröhren sind gemäß der Nanoröhren-Anordnung der Erfindung planar vorgesehen, d.h.



sie sind parallel zu der Oberflächenebene des Substrats angeordnet. Vorzugsweise sind sie parallel zueinander und jeweils in einem Abstand voneinander angeordnet. Diese Anordnung erhöht die mechanische Stabilität der Nanoröhren, da Letztere in horizontaler Richtung angeordnet sind, so dass anschaulich ein Abknicken der empfindlichen Nanoröhren vermieden ist. Dagegen stehen gemäß dem Stand der Technik Nanoröhren senkrecht aus einer Substratoberfläche hervor und sind daher mechanischen Störungen ausgesetzt. Die Nanoröhren-Anordnung der Erfindung ist mechanisch ausreichend robust, um unter Laborbedingungen eingesetzt werden zu können.

Die Nanoröhren-Anordnung kann ferner eine Schaltkreiseinrichtung aufweisen, mittels derer die Nanoröhren einzeln ansteuerbar und/oder auslesbar sind. So kann beispielsweise mittels der Schaltkreiseinrichtung der elektrische Widerstand jeder der Nanoröhren einzeln erfasst werden. Die Schaltkreiseinrichtung kann eine herkömmliche mikroelektronische Schaltung sein. Damit ist die Ankopplung einer Nanoröhren-Anordnung an einen herkömmlichen mikroelektronischen Schaltkreis realisiert. Die planare, horizontale Anordnung der Nanoröhren ist für die Integration in Silizium-Mikroelektronik besonders gut geeignet. Insbesondere kann die Mikroelektronik als integrierter Schaltkreis in dem Substrat vorgesehen sein, auf dem auch die mindestens eine Nanoröhre angeordnet ist.

Ferner kann mindestens einer der Teilbereiche der Katalysatorschicht zumindest teilweise von einer weiteren elektrisch isolierenden Schicht umgeben sein. Insbesondere kann die elektrisch isolierende Schicht und die weitere elektrisch isolierende Schicht, zwischen denen die Katalysatorschicht angeordnet ist, seitlich über die Katalysatorschicht hinausstehen, um so eine Pore auszubilden, durch welche Pore die zur Oberfläche des Substrats parallele Aufwuchsrichtung der Nanoröhre vorgebar ist. Anschaulich dient die waagerechte Pore als Schablone für das Wachstum der

Nanoröhre. Die Pore wird ausgebildet durch zwei beidseitig über die Katalysatorschicht hinausstehenden Wände, die durch die elektrisch isolierende Schicht und durch die weitere elektrisch isolierende Schicht ausgebildet werden. Durch die  
5 erste elektrisch isolierende Schicht und die zweite elektrisch isolierende Schicht wird ein Großteil der Oberfläche der Katalysatorschicht bedeckt, und es verbleibt nur ein kleiner Oberflächenbereich der Katalysatorschicht freiliegend. Dieser freiliegende Oberflächenbereich ist  
10 senkrecht zur Substratoberfläche orientiert. Lässt man auf dieser Oberfläche der Katalysatorschicht eine Nanoröhre aufwachsen, so ist die Aufwachsrichtung durch die Geometrie der Anordnung vorgegeben. Die Aufwachsrichtung der Kohlenstoffnanoröhre erfolgt senkrecht zur freiliegenden  
15 Oberfläche der Katalysatorschicht. Daher ist die Aufwachsrichtung der Nanoröhre horizontal, d.h. die Nanoröhre wächst in einer zu der Oberfläche des Substrats parallelen Richtung auf. Durch die beidseitig über die Katalysatorschicht überstehenden ersten und zweiten  
20 elektrisch isolierenden Schichten ist der Nanoröhre für den Aufwachsvorgang eine mechanische Führung gegeben, so dass das Aufwachsen in horizontaler Richtung parallel zur Oberfläche des Substrats erfolgt. Indem die Aufwachsrichtung durch die Geometrie der Poren vorgebar ist, ist eine definierte  
25 Struktur von Kohlenstoffnanoröhren realisierbar. Dieser hohe Grad an struktureller Definiertheit ist vorteilhaft bei der Ankopplung der Nanoröhren-Anordnung an eine herkömmliche Silizium-Mikroelektronik.

30 Ferner ist vorteilhaft, dass durch die erfindungsgemäße Nanoröhren-Anordnung einzelne Nanoröhren, und nicht wie gemäß dem Stand der Technik Büschel mit Durchmessern im Bereich von 50 nm bereitgestellt sind. Durch periodische Anordnung von Poren ist auch eine periodische Anordnung von Nanoröhren  
35 realisierbar. Es ist diesbezüglich zu betonen, dass die Ausdehnung der Pore ausreichend klein wählbar ist, so dass in bzw. aus einer Pore nur eine einzige Nanoröhre aufwächst.

Vorzugsweise sind die elektrisch isolierende Schicht und/oder die weitere elektrisch isolierende Schicht voneinander unabhängig aus einem oder einer Kombination der Materialien Siliziumnitrid und Siliziumdioxid hergestellt. Da diese Materialien für das Aufwachsen von Nanoröhren nicht katalytisch wirken, ist durch die Wahl dieser Materialien sichergestellt, dass jede Nanoröhre in einem räumlich genau definierten Bereich im Inneren der Pore, d.h. auf der Oberfläche der Katalysatorschicht aufwächst.

Auch kann bei der Nanoröhren-Anordnung der Erfindung mindestens einer der Teilbereiche der Katalysatorschicht zumindest teilweise von einer Schicht zur Verhinderung von Diffusion umgeben sein. Anschaulich verhindert diese Schicht zur Verhinderung von Diffusion, welche mindestens einen der Teilbereiche der Katalysatorschicht zumindest teilweise umgibt, dass Katalysatormaterial in benachbarte Schichten eindiffundiert bzw. das Material von den benachbarten Schichten in die Katalysatorschicht eindiffundiert. Insbesondere ist bekannt, dass katalytisch aktive Metalle die Neigung haben, in Silizium-Schichten beispielsweise eines angeschlossenen Schaltkreises einzudiffundieren. Durch die Schicht zur Verhinderung von Diffusion ist die Lebensdauer der Nanoröhren-Anordnung erhöht und ihre Funktionsweise sichergestellt. Vorzugsweise ist die Schicht zur Verhinderung von Diffusion aus Tantalnitrid-Material hergestellt.

Die Katalysatorschicht ist vorzugsweise aus einem oder einer Kombination der Materialien Nickel, Eisen und Kobalt hergestellt. Alternativ kann jedes andere geeignete Material, insbesondere jedes andere Metall, verwendet werden, welches das Wachstum von Nanoröhren katalysiert.

Vorzugsweise sind die Teilbereiche der Katalysatorschicht auf der Oberfläche des Substrats zueinander parallel angeordnet.

Durch diese parallele Anordnung ist die Ausbildung parallel angeordneter Poren ermöglicht.

Die Nanoröhren-Anordnung kann als Gassensor verwendet werden.

- 5 Für diesen Anwendungszweck ist eine Nanoröhre mit im Wesentlichen freiliegender Oberfläche erforderlich. Zwei Elektroden sind über die mindestens eine Nanoröhre elektrisch gekoppelt. Zum Zwecke der mechanischen Stabilisierung können die Endabschnitte der mindestens einen Kohlenstoffnanoröhre  
10 auf einer mechanisch robusten Oberfläche, beispielsweise einer elektrisch isolierenden Schicht, angeordnet sein. Die beschriebene Nanoröhren-Anordnung kann auf einem Substrat, beispielsweise einem Silizium-Wafer, aufgebracht sein. Zwischen den beiden Elektroden kann durch ein Mittel zum  
15 Erfassen des elektrischen Widerstandes der Widerstand der mindestens einen Nanoröhre erfasst werden.

- Die Verwendung der Nanoröhren-Anordnung als Gassensor macht sich den oben beschriebenen physikalischen Effekt zunutze,  
20 dass sich der elektrische Widerstand von Nanoröhren innerhalb weniger Sekunden um etwa drei Größenordnungen ändert, wenn eine Nanoröhre einer Gasatmosphäre, wie beispielsweise Stickstoffdioxid ( $\text{NO}_2$ ) oder Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), ausgesetzt ist. Es ist zu betonen, dass die als Gassensor verwendete Nanoröhren-  
25 Anordnung der Erfindung nicht auf das Detektieren der beiden genannten Gase beschränkt ist, ferner können auch andere Gase wie Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) nachgewiesen werden, deren Anwesenheit zu einer Änderung des elektrischen Widerstandes der Nanoröhren führt. Mit der Nanoröhren-Anordnung der Erfindung ist ein  
30 ausreichend robuster und empfindlicher, auf spezifische Gase selektiv sensitiver Gassensor bereitgestellt.

- Es sei noch hinzugefügt, dass die beiden elektrisch leitfähigen Elektroden sowie die Nanoröhren beispielsweise  
35 auf einem Halbleiterchip, z.B. einem CMOS-Chip integriert sein können. Das Mittel zum Erfassen des elektrischen Widerstandes kann beispielsweise ein Ohmmeter sein.

Die Nanoröhren in der Nanoröhren-Anordnung können Kohlenstoffnanoröhren sein.

- 5 Die Schritte des Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung werden im Weiteren zum Zwecke der Klarheit mit Großbuchstaben bezeichnet.

- 10 In einem Schritt B des Verfahrens wird eine Katalysatorschicht auf der Oberfläche der Schichtanordnung aufgebracht, wobei die Katalysatorschicht einen oder mehrere Teilbereiche aufweist.

- 15 In einem Schritt F wird mindestens eine Nanoröhre auf einem freiliegenden Teil der Oberfläche eines Teilbereichs der Katalysatorschicht aufgewachsen, derart, dass die mindestens eine Nanoröhre parallel zur Oberfläche der Schichtanordnung angeordnet wird.

- 20 Ferner kann bei dem Verfahren zur Herstellung einer Nanoröhren-Anordnung in einem weiteren Schritt A die bei Schritt B genannte Schichtanordnung durch Aufbringen einer elektrisch isolierenden Schicht auf einem Substrat ausgebildet werden.

- 25 Auch kann in einem Schritt C eine weitere elektrisch isolierende Schicht auf mindestens einem Teil der Oberfläche der Schichtanordnung aufgebracht werden, derart, dass die weitere elektrisch isolierende Schicht mindestens einen der  
30 Teilbereiche der Katalysatorschicht mindestens teilweise bedeckt.

- Darüber hinaus kann in einem Schritt D ein Graben in einen Oberflächenbereich der Schichtanordnung geätzt werden.

- 35 In einem Schritt E kann die Katalysatorschicht teilweise zurückgeätzt werden, derart, dass die elektrisch isolierende

Schicht und die weitere elektrisch isolierende Schicht seitlich über die Katalysatorschicht hinausstehen, so dass eine Pore als Führung für das Aufwachsen der Nanoröhre erzeugt wird, durch welche die zur Oberfläche des Substrats parallele Aufwachsrichtung der Nanoröhren vorgegeben wird.

In einem Schritt F wird mindestens eine Nanoröhre auf einem freiliegenden Teil der Oberfläche eines Teilbereichs der Katalysatorschicht aufgewachsen, derart, dass die mindestens eine Nanoröhre parallel zur Oberfläche der Schichtanordnung angeordnet wird.

Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung werden die oben genannten Schritte A bis F in der folgenden Reihenfolge ausgeführt:

Zunächst wird in Schritt A eine Schichtanordnung durch Aufbringen einer elektrisch isolierenden Schicht auf einem Substrat ausgebildet. Dann wird in einem nachfolgenden Schritt B eine Katalysatorschicht auf der Oberfläche der Schichtanordnung aufgebracht, wobei die Katalysatorschicht einen oder mehrere Teilbereiche aufweist. Anschließend wird in einem weiteren Schritt C eine weitere elektrisch isolierende Schicht auf mindestens einen Teil der Oberfläche der Schichtanordnung aufgebracht, derart, dass die weitere elektrisch isolierende Schicht mindestens einen der Teilbereiche der Katalysatorschicht teilweise bedeckt. Danach wird in einem Schritt D ein Graben in einen Oberflächenbereich der Schichtanordnung geätzt. In einem nachfolgenden Schritt E wird die Katalysatorschicht teilweise zurückgeätzt, derart, dass die elektrisch isolierende Schicht und die weitere elektrisch isolierende Schicht seitlich über die Katalysatorschicht hinausstehen, so dass eine Pore erzeugt wird, durch welche die zur Oberfläche des Substrats parallele Aufwachsrichtung der Nanoröhre vorgegeben wird. In einem Schritt F wird dann mindestens eine Nanoröhre auf einem

freiliegenden Teil der Oberfläche eines Teilbereichs der Katalysatorschicht aufgewachsen, derart, dass die mindestens eine Nanoröhre parallel zur Oberfläche der Schichtanordnung angeordnet wird.

5

Anschaulich wird in Schritt A eine elektrisch isolierende Schicht auf einem Substrat ausgebildet. Insbesondere kann dies durch Abscheiden von Siliziumnitrid-Material auf einem Silizium-Wafer geschehen. In Schritt B wird eine

10

Katalysatorschicht auf der Oberfläche der Schichtanordnung aufgebracht, wobei die Katalysatorschicht einen oder mehrere Teilbereiche aufweist. Dies kann realisiert werden, indem eine als Katalysatorschicht geeignete Nickel-Schicht in einer Dicke von ungefähr 20 nm auf der Oberfläche der

15

Siliziumnitrid-Schicht abgeschieden wird und diese Nickel-Schicht unter Verwenden des Verfahrens der

Elektronenstrahlolithographie zu vorzugsweise im Wesentlichen parallel zueinander verlaufenden Drähten von ungefähr 20 nm Breite strukturiert wird. In dem nachfolgenden Schritt C wird

20

eine weitere elektrisch isolierende Schicht auf mindestens einem Teil der Oberfläche der Schichtanordnung derart aufgebracht, dass die weitere elektrisch isolierende Schicht mindestens einen der Teilbereiche der Katalysatorschicht mindestens teilweise bedeckt. Hierzu kann beispielsweise

25

Siliziumdioxid-Material auf der Oberfläche der Schichtanordnung abgeschieden werden und mittels eines Photolithographie-Verfahrens strukturiert werden, so dass die weitere elektrisch isolierende Schicht nur noch auf einem Teil der Oberfläche der Schichtanordnung verbleibt.

30

Insbesondere überdeckt die weitere elektrisch isolierende Schicht zumindest teilweise die Katalysatorschicht. In dem weiteren Schritt D wird ein Graben in einen

Oberflächenbereich der Schichtanordnung geätzt. Dies kann realisiert werden, indem mittels eines Photolithographie-

35

Verfahrens der freiliegende Bereich der elektrisch isolierenden Schicht teilweise zurückgeätzt wird. In einem weiteren Schritt E wird die Katalysatorschicht teilweise

14

zurückgeätzt, derart, dass die elektrisch isolierende Schicht und die weitere elektrisch isolierende Schicht beidseitig über die Katalysatorschicht hinausstehen, so dass eine Pore erzeugt wird, durch welche die zur Oberfläche des Substrats parallele Aufwachsrichtung der Nanoröhre vorgegeben wird. Dieser Verfahrensschritt kann dadurch realisiert werden, dass die Nickel-Schicht nasschemisch zurückgeätzt wird und so Poren erzeugt werden. Diese Poren entstehen anschaulich dadurch, dass die Nickelschicht entlang einer Richtung parallel zur Substratoberfläche so weit zurückgeätzt wird, dass sowohl die unterhalb der Nickel-Schicht angeordnete Siliziumnitrid-Schicht als auch die oberhalb der Nickel-Schicht angeordnete Siliziumdioxid-Schicht in seitlicher Richtung oberhalb und unterhalb der Nickel-Schicht über Letztere hinausstehen. In einem Schritt F wird dann mindestens eine Nanoröhre auf einem freiliegenden Teil der Oberfläche eines Teilbereichs der Katalysatorschicht aufgewachsen, derart, dass die mindestens eine Nanoröhre parallel zur Oberfläche der Schichtanordnung angeordnet wird. Das Aufwachsen der Nanoröhren kann beispielsweise unter Verwendung des Gasphasenepitaxie-Verfahrens realisiert werden.

Das Verfahren zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung weist eine Reihe von Vorteilen auf. Durch eine Kombination von halbleitertechnologischen Nanostrukturtechniken und einer Technik zum Aufwachsen von Nanoröhren sind geometrisch geordnete Strukturen von planar angeordneten Nanoröhren herstellbar. Die Einzelschritte des Verfahrens beruhen wie oben beschrieben auf ausgereiften, standardisierten halbleitertechnologischen Prozessen. Daher ist zum Ausführen des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen der Nanoröhren-Anordnung eine Neuentwicklung von Anlagen entbehrlich. Dies ist zeit- und kostensparend.

Ein großer Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht darin, dass durch die oben beschriebene Porengeometrie das



Herstellen von Nanoröhren hinsichtlich Dimension und Wachsrichtung exakt vorgebar ist. Die Querschnittsfläche einer Nanoröhre ist durch die Dimension der freiliegenden Katalysatoroberfläche festgelegt, da nur von einem

5 katalytisch aktiven Material aus das Nanoröhren-Wachstum beginnen kann. Die bevorzugte Wachstumsrichtung einer Nanoröhre ist erfindungsgemäß bereits durch den Normalenvektor der freiliegenden Katalysatoroberfläche vorgegeben, und wird zusätzlich durch die beidseitig der  
10 Katalysatorschicht angeordneten elektrisch isolierenden Schichten stabilisiert. Damit ist der Nanoröhre beim Aufwachsen eine mechanische Führung gegeben, so dass die Nanoröhre in vorgegebbarer Richtung parallel zu der Oberfläche des Substrats aufwächst.

15

Ferner kann die Dicke der Katalysatorschicht erfindungsgemäß genau eingestellt werden. Gemäß dem oben beschriebenen Beispiel ist die Dicke der Katalysatorschicht beispielsweise ungefähr 20 nm. Indem die Dicke ausreichend klein gewählt  
20 wird, ist sichergestellt, dass auf der Pore nur eine einzige Nanoröhre aufwachsen kann.

Gemäß einer anderen Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung ist die  
25 Reihenfolge der oben einzeln beschriebenen Schritte gegenüber dem zuvor beschriebenen Ausführungsbeispiel verändert. Der oben mit D bezeichnete Schritt wird gemäß dem hier beschriebenen Ausführungsbeispiel nach dem Schritt A und vor dem Schritt B ausgeführt. Im einzelnen werden die Schritte in  
30 folgender Reihenfolge ausgeführt:

Zunächst wird in Schritt A eine Schichtanordnung durch Aufbringen einer elektrisch isolierenden Schicht auf einem Substrat ausgebildet. Dieser Schritt kann realisiert werden,  
35 indem eine Siliziumnitrid-Schicht auf einem Silizium-Wafer abgeschieden wird. In einem nachfolgenden Schritt D wird ein Graben in einen Oberflächenbereich der Schichtanordnung

geätzt. Dies kann durch Photostrukturieren der aufgetragenen Siliziumnitrid-Schicht und anschließendes Ätzen erfolgen. Danach wird in einem Schritt B eine Katalysatorschicht auf der Oberfläche der Schichtanordnung aufgebracht, wobei die

5 Katalysatorschicht einen oder mehrere Teilbereiche aufweist. Dies kann realisiert werden, indem eine Katalysatorschicht, beispielsweise eine 20 nm dicke Nickel-Schicht auf der Oberfläche der Schichtanordnung abgeschieden wird und mittels Elektronenstrahlolithographie zu Drähten von im Wesentlichen

10 zueinander parallel verlaufenden Drähten von ungefähr 20 nm Dicke strukturiert wird. In einem nachfolgenden Schritt C wird eine weitere elektrisch isolierende Schicht auf mindestens einen Teil der Oberfläche der Schichtanordnung

15 Schicht mindestens einen der Teilbereiche der Katalysatorschicht mindestens teilweise bedeckt. Dieser Verfahrensschritt kann realisiert werden, indem die Oberfläche der Schichtstruktur zunächst mit einem Photolack bedeckt und dieser dann mittels eines Lithographieverfahrens

20 strukturiert wird. Dann wird beispielsweise eine Siliziumnitrid-Schicht durch Sputtern oder Verdampfen auf der Schichtanordnung abgeschieden. Unter Verwendung eines Lift-Off-Verfahrens kann dann die Siliziumnitrid-Schicht und die darunter liegende Photolack-Schicht von einem Teilbereich der

25 Oberfläche der Schichtanordnung entfernt werden. Dadurch bleibt eine Siliziumnitrid-Schicht nur auf einem gewünschten Oberflächenbereich der Schichtanordnung zurück, erfindungsgemäß nur auf der Oberfläche der Katalysatorschicht. Nun wird in einem nachfolgenden Schritt E

30 die Katalysatorschicht teilweise zurückgeätzt, derart, dass die elektrisch isolierende Schicht und die weitere elektrisch isolierende Schicht seitlich über die Katalysatorschicht hinausstehen, so dass eine Pore erzeugt wird, durch welche die zur Oberfläche des Substrats parallele Aufwuchsrichtung

35 der Nanoröhre vorgegeben wird. Dies kann wie bereits oben beschrieben durch nasschemisches Rückätzen von Nickel erfolgen, so dass Poren zurückbleiben. In einem weiteren

Verfahrensschritt F wird dann mindestens eine Nanoröhre auf dem freiliegenden Teil der Oberfläche eines Teilbereichs der Katalysatorschicht aufgewachsen, derart, dass die mindestens eine Nanoröhre parallel zur Oberfläche der Schichtanordnung  
5 angeordnet wird. Die Herstellung von Nanoröhren kann beispielsweise durch Gasphasenepitaxie erfolgen.

Das erfindungsgemäße Verfahren kann ferner an einer geeigneten Stelle einen weiteren Verfahrensschritt aufweisen,  
10 bei dem zwischen mindestens einen Teilbereich der Katalysatorschicht und die an dem mindestens einen Teilbereich der Katalysatorschicht angrenzenden Schichten zumindest teilweise mindestens eine Schicht zur Verhinderung von Diffusion eingebracht wird. Bei der Ankopplung der  
15 Nanoröhren-Anordnung an eine herkömmlichen Silizium-Mikroelektronik ist es vorteilhaft, das katalytisch aktive Metall mit Diffusionsbarrieren zu umgeben. Denn das Katalysatormetall kann thermisch in Silizium-Bereiche eines angeschlossenen Schaltkreises eindiffundieren. Als Material  
20 für die Schicht zur Verhinderung von Diffusion kann Tantalnitrid verwendet werden.

Die elektrisch isolierende Schicht und/oder die weitere elektrisch isolierende Schicht können aus einem oder einer  
25 Kombination der Materialien Siliziumnitrid und Siliziumdioxid hergestellt werden. Es kann jedoch auch jedes andere dafür geeignete Material verwendet werden.

Die Katalysatorschicht wird vorzugsweise aus einem oder einer  
30 Kombination der Materialien Nickel, Eisen und Kobalt hergestellt. Alternativ kann jedes andere Material verwendet werden, welches das Wachstum von Nanoröhren katalysiert.

Es ist anzumerken, dass die verfahrensgemäß auf die Anordnung  
35 aufgebrauchte mindestens eine Nanoröhre vorzugsweise eine Kohlenstoffnanoröhre ist.

Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in den Figuren dargestellt und werden im Weiteren näher erläutert.

Es zeigen:

5

Figur 1A eine Draufsicht einer Nanoröhren-Anordnung gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung,

10

Figur 1B einen Querschnitt einer Nanoröhren-Anordnung entlang der Schnittlinie I-I' aus Figur 1A gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung,

15

Figur 1C eine Draufsicht einer Nanoröhren-Anordnung gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel der Erfindung,

Figur 1D einen Querschnitt einer Nanoröhren-Anordnung entlang der Schnittlinie II-II' aus Figur 1C gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel der Erfindung,

20

Figur 1E eine Draufsicht einer Nanoröhren-Anordnung gemäß einem dritten Ausführungsbeispiel der Erfindung,

25

Figur 1F einen Querschnitt einer Nanoröhren-Anordnung entlang der Schnittlinie III-III' aus Figur 1E gemäß dem dritten Ausführungsbeispiel der Erfindung,

30

Figur 2 einen Querschnitt einer Nanoröhren-Anordnung gemäß einem Ausführungsbeispiel der erfindungsgemäßen Nanoröhren-Anordnung zur Verwendung als Gassensor,

35

Figur 3A eine Draufsicht (links) und einen Querschnitt entlang der Schnittlinie IVa-IVa' (rechts) einer Schichtanordnung nach einem ersten Verfahrensabschnitt gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung,

Figur 3B eine Draufsicht und einen Querschnitt entlang der Schnittlinie IVb-IVb' einer Schichtanordnung nach einem zweiten Verfahrensabschnitt gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung,

Figur 3C eine Draufsicht und einen Querschnitt entlang der Schnittlinie IVc-IVc' einer Schichtanordnung nach einem dritten Verfahrensabschnitt gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung,

Figur 3D eine Draufsicht und einen Querschnitt entlang der Schnittlinie IVd-IVd' einer Schichtanordnung nach einem vierten Verfahrensabschnitt gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung,

Figur 3E eine Draufsicht und einen Querschnitt entlang der Schnittlinie IVe-IVe' einer Schichtanordnung nach einem fünften Verfahrensabschnitt gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung,

Figur 3F eine Draufsicht und einen Querschnitt entlang der Schnittlinie IVf-IVf' einer Schichtanordnung nach einem sechsten Verfahrensabschnitt gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung,

Figur 3G eine Draufsicht und einen Querschnitt entlang der Schnittlinie IVg-IVg' einer Schichtanordnung nach einem siebten Verfahrensabschnitt gemäß einem bevorzugten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung,

Figur 4A eine Draufsicht (links) und einen Querschnitt entlang der Schnittlinie Va-Va' (rechts) einer Schichtanordnung nach einem ersten Verfahrensabchnitt gemäß einem anderen bevorzugten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung,

Figur 4B eine Draufsicht und einen Querschnitt entlang der Schnittlinie Vb-Vb' einer Schichtanordnung nach einem zweiten Verfahrensabchnitt gemäß dem anderen bevorzugten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung,

Figur 4C eine Draufsicht und einen Querschnitt entlang der Schnittlinie Vc-Vc' einer Schichtanordnung nach einem dritten Verfahrensabchnitt gemäß dem anderen bevorzugten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung,

Figur 4D eine Draufsicht und einen Querschnitt entlang der Schnittlinie Vd-Vd' einer Schichtanordnung nach einem vierten Verfahrensabchnitt gemäß dem anderen bevorzugten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung,

Figur 4E eine Draufsicht und einen Querschnitt entlang der Schnittlinie Ve-Ve' einer Schichtanordnung nach einem fünften Verfahrensabchnitt gemäß dem anderen bevorzugten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung,

Figur 5A einen Querschnitt einer Schichtanordnung nach einem ersten Verfahrensabchnitt gemäß einem weiteren bevorzugten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung,

Figur 5B einen Querschnitt einer Schichtanordnung nach einem zweiten Verfahrensabschnitt gemäß dem weiteren bevorzugten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung,

5

Figur 5C einen Querschnitt einer Schichtanordnung nach einem dritten Verfahrensabschnitt gemäß dem weiteren bevorzugten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung,

10

Figur 5D einen Querschnitt einer Schichtanordnung nach einem vierten Verfahrensabschnitt gemäß dem weiteren bevorzugten Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung.

15

In **Fig. 1A** ist ein erstes Ausführungsbeispiel einer Nanoröhren-Anordnung 100 der Erfindung gezeigt, die aufweist: ein Substrat 101, eine Katalysatorschicht 102, die einen oder mehrere Teilbereiche aufweist, auf der Oberfläche des Substrats 101 und mindestens eine parallel zur Oberfläche des Substrats 101 auf der Oberfläche der Katalysatorschicht 102 angeordnete Nanoröhre 103. Gemäß dem in **Fig. 1A** gezeigten Ausführungsbeispiel weist die Nanoröhren-Anordnung 100 drei Teilbereiche der Katalysatorschicht 102 auf, wobei an jedem der Teilbereiche der Katalysatorschicht 102 jeweils eine Nanoröhre 103 angeordnet ist. In **Fig. 1B** ist eine Querschnittsansicht entlang der Schnittlinie I-I' der Nanoröhren-Anordnung 100 aus **Fig. 1A** gezeigt.

30 In **Fig. 1C** ist eine Nanoröhren-Anordnung 110 gemäß einem zweiten Ausführungsbeispiel der Erfindung gezeigt. In **Fig. 1D** ist eine Querschnittsansicht entlang der Schnittlinie II-II' der Nanoröhren-Anordnung 110 aus **Fig. 1C** gezeigt. Die Nanoröhren-Anordnung 110 weist gegenüber der Nanoröhren-Anordnung 100 zusätzlich eine elektrisch isolierende Schicht 104 auf, die zwischen dem Substrat 101 und der Katalysatorschicht 102 angeordnet ist. Die elektrisch

35

isolierende Schicht 104 weist eine derartige Topographie auf, hat also eine derartige Oberflächenstruktur, dass die mindestens eine Nanoröhre 103 in ihren Endabschnitten 103a auf der elektrisch isolierenden Schicht 104 aufliegt und in  
5 ihrem Mittenabschnitt 103b freiliegt.

Wie insbesondere der in **Fig. 1C** gezeigten Draufsicht der Nanoröhren-Anordnung 110 zu entnehmen ist, sind die Teilbereiche der Katalysatorschicht 102 voneinander  
10 elektrisch entkoppelt. Auch sind die Teilbereiche der Nanoröhren 103 voneinander elektrisch entkoppelt.

In **Fig. 1E** ist als drittes Ausführungsbeispiel der Erfindung eine Nanoröhren-Anordnung 120 in Draufsicht gezeigt. In  
15 **Fig. 1F** ist eine Querschnittsansicht entlang der Schnittlinie III-III' der Nanoröhren-Anordnung 120 aus **Fig. 1E** gezeigt. Die Nanoröhren-Anordnung 120 weist über die in den Nanoröhren-Anordnungen 100, 110 gezeigten Merkmale hinaus zusätzliche Merkmale auf: so weist die in **Fig. 1E, Fig. 1F**  
20 gezeigte Nanoröhren-Anordnung 120 eine Schaltungseinrichtung 105 auf, mittels derer die Nanoröhren 103 einzeln ansteuerbar und/oder auslesbar sind. Ferner sind gemäß der in **Fig. 1E, Fig. 1F** gezeigten Nanoröhren-Anordnung 120 alle drei Teilbereiche der Katalysatorschicht 102 von einer weiteren  
25 elektrisch isolierenden Schicht 106 umgeben. Indem die elektrisch isolierende Schicht 104 und die weitere elektrisch isolierende Schicht 106, zwischen denen die Katalysatorschicht 102 angeordnet ist, beidseitig seitlich über die Katalysatorschicht 102 hinausstehen, ist eine Pore  
30 ausgebildet, durch welche die zur Oberfläche des Substrats 101 parallele Aufwärtsrichtung der Nanoröhren 103 vorgebar ist. Darüber hinaus ist, wie in **Fig. 1F** gezeigt, mindestens einer der Teilbereiche der Katalysatorschicht 102 von einer Schicht zur Verhinderung von Diffusion 107 umgeben.

35

Mittels der Schaltungseinrichtung 105 ist die Nanoröhren-Anordnung 120 an eine externe Elektronik ankoppelbar,



beispielsweise eine CMOS-Schaltung. Wie in **Fig. 1E** angedeutet, ist jede der drei Nanoröhren 103 über die elektrisch leitfähige Katalysatorschicht 102 mit einer Anschlusselektrode 108 der Schaltkreiseinrichtung 105 gekoppelt.

Indem durch die aus **Fig. 1F** ersichtliche geometrische Anordnung der elektrisch isolierenden Schicht 104, der drei Teilbereiche der Katalysatorschicht 102 und der weiteren elektrisch isolierenden Schicht 106 drei waagerechte Poren erzeugt sind, von denen jede als Schablone für das Wachstum einer der drei Nanoröhren 103 dient, ist eine planare Anordnung von Nanoröhren 103 realisiert. Durch exaktes Vorgeben der Aufwachsstelle und der Aufwachsrichtung sind geometrisch genau strukturierbare Anordnungen von Nanoröhren herstellbar.

Die elektrisch isolierende Schicht 104 und/oder die weitere elektrisch isolierende Schicht 106 sind aus einem oder einer Kombination der Materialien Siliziumnitrid und Siliziumdioxid hergestellt. Gemäß alternativer Ausführungsbeispiele der Erfindung können die elektrisch isolierende Schicht 104 und/oder die weitere elektrisch isolierende Schicht 106 aus einem anderen geeigneten Material hergestellt sein, das die Eigenschaft aufweisen muss, bezüglich dem Aufwachsen von Nanoröhren 103 nicht katalytisch zu wirken. Die Nanoröhren-Anordnung 120 weist eine Schicht zur Verhinderung von Diffusion 107 auf, die vorzugsweise aus Tantalnitrid hergestellt ist. Diese verhindert, dass beispielsweise durch thermische Einflüsse Material der Katalysatorschicht in möglicherweise angrenzende Silizium-Bereiche eines angekoppelten mikroelektronischen Schaltkreises eindiffundiert. Damit wirkt die Schicht zur Verhinderung von Diffusion 107 als Diffusionsbarriere für das katalytisch aktive Material.

Die Katalysatorschicht 102 ist gemäß diesem Ausführungsbeispiel aus einem oder einer Kombination der Materialien Nickel, Eisen und Kobalt hergestellt. Es kann aber auch jedes andere geeignete Material verwendet werden, welches das Aufwachsen von Nanoröhren 103 katalysiert. Sollen, wie in Fig. 1E und Fig. 1F symbolisiert, die Nanoröhren 103 durch die Katalysatorschicht 102 mit Anschlusselektroden 108 einer externen Schaltungseinrichtung 105 gekoppelt werden, so ist für die Katalysatorschicht 102 ein elektrisch leitfähiges Material zu wählen.

Die Nanoröhren 103 in den Nanoröhren-Anordnungen 100, 110, 120 sind Kohlenstoffnanoröhren.

In Fig. 2 ist als Anwendungsbeispiel für die erfindungsgemäße Nanoröhren-Anordnung ein Gassensor 200 gezeigt. Der Gassensor 200 weist auf ein strukturiertes Substrat 201, eine elektrisch isolierende Schicht 202, eine elektrisch leitfähige Katalysatorschicht 203, eine weitere elektrisch isolierende Schicht 204, eine Kohlenstoffnanoröhre 205 und eine Elektrode 206.

Die Funktionalität des Gassensors 200 beruht auf dem oben beschriebenen physikalischen Effekt, dass der elektrische Widerstand einer Kohlenstoffnanoröhre 205 äußerst empfindlich von der die Kohlenstoffnanoröhre 205 umgebenden Gasatmosphäre abhängt. Wie oben ausgeführt, verringert sich in einer Ammoniakatmosphäre ( $\text{NH}_3$ ) die elektrische Leitfähigkeit von Kohlenstoffnanoröhren um ungefähr drei Zehnerpotenzen. Umgekehrt erhöht sich die elektrische Leitfähigkeit um ungefähr drei Größenordnungen, wenn die Kohlenstoffnanoröhre 205 einer Stickstoffdioxidatmosphäre ( $\text{NO}_2$ ) in einer Konzentration von 200 ppm („parts per million“,  $10^{-6}$ ) ausgesetzt wird.

Wird in einem in Fig. 2 nicht gezeigten Mittel zum Erfassen des elektrischen Widerstandes der elektrischen Widerstand der

Kohlenstoffnanoröhre 205 zwischen den elektrisch leitfähigen Schichten 203 und 206 abgenommen, wenn die in ihrem Mittenabschnitt 205a freiliegende Oberfläche der Kohlenstoffnanoröhre 205 einer bestimmten Gasatmosphäre ausgesetzt ist, so ist der Wert des elektrischen Widerstandes der Kohlenstoffnanoröhre 205 ein charakteristisches Maß für die Art bzw. die Konzentration des die Kohlenstoffnanoröhre 205 umgebenden Gases. Das Mittel zum Erfassen des elektrischen Widerstandes ist vorzugsweise in das Substrat 201 integriert. Vorzugsweise ist die zwischen der elektrisch leitfähigen Katalysatorschicht 203 und der elektrisch leitfähigen Elektrode 206 angeordnete Kohlenstoffnanoröhre 205 mit einer in ihrem Mittenabschnitt 205a im Wesentlichen freiliegenden Oberfläche bereitzustellen. Dagegen sind die Endabschnitte 205b der Nanoröhre 205 nicht freiliegend, sondern mit der weiteren elektrisch isolierenden Schicht 204 bzw. mit der elektrisch leitfähigen Elektrode 206 gekoppelt.

Um die Messgenauigkeit des Gassensors 200 zu erhöhen, können mehrere Kohlenstoffnanoröhren 205, von denen alle oder ein Teil einer bestimmten Gasatmosphäre ausgesetzt sind, entweder parallel oder in Reihe oder teilweise parallel und teilweise in Reihe geschaltet werden. Dies kann bezugnehmend auf Fig. 2 beispielsweise geschehen, indem die einzelnen Kohlenstoffnanoröhren 205 zueinander im Wesentlichen parallel in einer Ebene senkrecht zu der Zeichenebene angeordnet sind.

Der in Fig. 2 gezeigte Gassensor 200 kann beispielsweise wie folgt beschrieben betrieben werden. Die Anordnung 200 wird mit einer zu detektierenden Gasatmosphäre in Wirkkontakt gebracht. Zwischen den elektrisch leitfähigen Kontaktierungen 203, 206 der Kohlenstoffnanoröhren 205 ist durch das Mittel zum Erfassen des elektrischen Widerstandes der elektrische Widerstand der Kohlenstoffnanoröhre 205 ermittelbar, wobei der Wert des elektrischen Widerstandes der Kohlenstoffnanoröhre 205 charakteristisch für die Konzentration bzw. die Art des umgebenden Gases ist. Indem

die empfindliche Kohlenstoffnanoröhre 205 auf der robusten elektrisch isolierenden Schicht 202 bzw. auf dem robusten strukturierten Substrats 201 aufgebracht ist, ist der Gassensor 200 ausreichend robust ausgestaltet, um für den  
5 praktischen Einsatz im Labor geeignet zu sein.

Im Weiteren wird beziehungsweise auf Fig. 3A, Fig. 3B, Fig. 3C, Fig. 3D, Fig. 3E, Fig. 3F und Fig. 3G ein erstes bevorzugtes Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zum  
10 Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung beschrieben, das die Verfahrensschritte A, B, C, D, E, F aufweist. Gemäß dem beschriebenen Ausführungsbeispiel sind diese Schritte in der Reihenfolge A, B, C, D, E, F durchzuführen. In Fig. 3A, Fig. 3B, Fig. 3C, Fig. 3D, Fig. 3E, Fig. 3F bzw. Fig. 3G sind  
15 jeweils auf der linken Seite eine Draufsicht und auf der rechten Seite eine zugehörige Querschnittsansicht entlang der Schnittlinien IVa-IVa', IVb-IVb', IVc-IVc', IVd-IVd', IVe-IVe', IVf-IVf' bzw. IVg-IVg' derjenigen Schichtanordnung gezeigt, wie sie jeweils nach Durchführung der einzelnen  
20 Verfahrensschritte erhalten wird.

In Schritt A wird eine Schichtanordnung 300 durch Aufbringen einer elektrisch isolierenden Schicht 301 auf einem Substrat 302 ausgebildet.

25 Die nach Durchführen von Schritt A erhaltene Schichtstruktur 300 ist in Fig. 3A gezeigt. Vorzugsweise ist das Substrat 302 ein Silizium-Wafer, alternativ kann das Substrat 302 auch ein Glas-Substrat sein. Die auf dem Substrat 302 abgeschiedene  
30 elektrisch isolierende Schicht 301 kann beispielsweise eine Siliziumnitrid-Schicht sein oder kann alternativ eine Siliziumdioxid-Schicht sein.

In Schritt B wird eine Katalysatorschicht 303 auf der  
35 Oberfläche der Schichtanordnung 300 aufgebracht, wobei die Katalysatorschicht 303 einen oder mehrere Teilbereiche aufweist.

Nachdem Schritt B ausgeführt ist, wird eine Schichtanordnung 304 erhalten (vgl. **Fig. 3B**). Gemäß der in **Fig. 3B** gezeigten Schichtanordnung 304 weist die Katalysatorschicht 303 fünf  
5 Teilbereiche auf. Schritt B wird realisiert, indem in einem ersten Teilschritt eine Katalysatorschicht 303 auf die Oberfläche der Schichtanordnung 300 abgeschieden wird. Es wird eine 20 nm dicke Nickel-Schicht auf der Oberfläche der Schichtstruktur 300 abgeschieden. Diese auf der gesamten  
10 Oberfläche der Schichtstruktur 300 abgesetzte Nickel-Schicht wird dann in einem zweiten Teilschritt unter Verwendung eines geeigneten Lithographieverfahrens, beispielsweise mittels Elektronenstrahlolithographie, strukturiert. Vorzugsweise wird die abgeschiedene Nickel-Schicht derart strukturiert, dass  
15 Drähte von 20 nm Durchmesser zurückbleiben.

In einem Schritt C wird sodann eine weitere elektrisch isolierende Schicht 305 auf mindestens einen Teil der Oberfläche der Schichtanordnung 304 aufgebracht, derart, dass  
20 die weitere elektrisch isolierende Schicht 305 mindestens einen der Teilbereiche der Katalysatorschicht 303 mindestens teilweise bedeckt.

Die Teilschritte des Schrittes C sind anhand **Fig. 3C** und **Fig. 3D** nachzuvollziehen. In einem ersten Teilschritt wird die  
25 weitere elektrisch isolierende Schicht 305 auf die Oberfläche der Schichtanordnung 304 aufgebracht. Beispielsweise kann dies erfolgen, indem eine Siliziumdioxid-Schicht auf der Oberfläche der Schichtanordnung 304 aufgebracht wird. Dadurch  
30 wird eine Schichtanordnung 306 erhalten, wie sie in **Fig. 3C** gezeigt ist. In einem zweiten Teilschritt wird dann die aufgebrachte weitere elektrisch isolierende Schicht 305 unter Verwenden eines geeigneten Lithographie- bzw. Ätzverfahrens strukturiert. Dadurch wird die in **Fig. 3D** gezeigte  
35 Schichtanordnung 307 erhalten, bei der ein Teilbereich der weiteren elektrisch isolierenden Schicht 305 die Katalysatorschicht 303 teilweise bedeckt.

In einem nachfolgenden Schritt D wird ein Graben 308 in einen Oberflächenbereich der Schichtanordnung 307 geätzt.

- 5 Daraus resultiert die in **Fig. 3E** dargestellte Schichtanordnung 309. Verfahrensschritt D wird mittels eines geeigneten Photolithographieverfahrens realisiert.

- In einem nächsten Verfahrensschritt E wird die  
10 Katalysatorschicht 303 teilweise zurückgeätzt, derart, dass die elektrisch isolierende Schicht 301 und die weitere elektrisch isolierende Schicht 305 seitlich über die Katalysatorschicht 303 hinausstehen, so dass eine Pore 310 erzeugt wird, durch welche die zur Oberfläche des Substrats  
15 302 parallele Aufwachsrichtung der Nanoröhre vorgegeben wird.

- Nach diesem Verfahrensschritt wird die Schichtanordnung 311 erhalten, die in **Fig. 3F** dargestellt ist. Indem durch das beidseitig seitliche Überstehen der elektrisch isolierenden  
20 Schicht 301 und der weiteren elektrisch isolierenden Schicht 305 über die Katalysatorschicht 303 hinaus eine Pore 310 ausgebildet wird, wird die Art und Weise des nachfolgenden Aufwachsens der Nanoröhre (siehe Schritt F, unten) weitgehend festgelegt. Da Nanoröhren bevorzugt auf katalytisch aktivem  
25 Material, d.h. auf freiliegenden Oberflächenbereichen der Katalysatorschicht 303, aufwachsen, ist die „Keimstelle“ des Nanoröhren-Wachstums festgelegt. Durch das seitliche Überstehen der elektrisch isolierenden Schicht 301 und der weiteren elektrisch isolierenden Schicht 305 über die  
30 Katalysatorschicht 303 ist ferner die Aufwachsrichtung definiert. Anschaulich ist für das Aufwachsen der Nanoröhre eine Führung bzw. eine Schablone bereitgestellt. Dadurch lassen sich Durchmesser, Wachsrichtung und Anordnung der Nanoröhren durch die Porengeometrie steuern.  
35 Verfahrenstechnisch kann das Rückätzen der Katalysatorschicht 303 durch nasschemisches Rückätzen realisiert werden. So sind aus dem Stand der Technik Verfahren bekannt, mittels derer

beispielsweise aus Nickel bestehende Katalysatorschichten 303 nasschemisch zurückgeätzt werden können.

In einem nachfolgenden Schritt F wird mindestens eine  
5 Nanoröhre 312 auf einem freiliegenden Teil der Oberfläche eines Teilbereichs der Katalysatorschicht 303 aufgewachsen, derart, dass die mindestens eine Nanoröhre 312 parallel zur Oberfläche der Schichtanordnung 311 angeordnet wird.

10 Nachdem Schritt F ausgeführt ist, wird die Schichtanordnung 313 erhalten, die in **Fig. 3G** dargestellt ist. Die Herstellung der Nanoröhren 312 erfolgt beispielsweise mittels Gasphasenepitaxie. Wie weiter oben ausgeführt, sind durch die Poren 310 sowie durch die Dicke der Katalysatorschicht 303  
15 Aufwuchsrichtung und Durchmesser der Nanoröhren 312 vorgebbbar.

Im Weiteren wird ein zweites Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-  
20 Anordnung anhand der **Fig. 4A, Fig. 4B, Fig. 4C, Fig. 4D, Fig. 4E** erläutert. Dieses unterscheidet sich im Wesentlichen von dem zuvor dargestellten Ausführungsbeispiel in der Reihenfolge, in der die Schritte A bis F durchgeführt werden. In **Fig. 4A, Fig. 4B, Fig. 4C, Fig. 4D** bzw. **Fig. 4E** sind  
25 jeweils auf der linken Seite eine Draufsicht und auf der rechten Seite eine zugehörige Querschnittsansicht entlang der Schnittlinien Va-Va', Vb-Vb', Vc-Vc', Vd-Vd' bzw. Ve-Ve' derjenigen Schichtanordnung gezeigt, wie sie jeweils nach Durchführung einzelner Verfahrensschritte erhalten wird.

30

Das zweite Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung weist die folgenden Schritte auf:

35 In Schritt A wird eine Schichtanordnung 400 durch Aufbringen einer elektrisch isolierenden Schicht 401 auf einem Substrat 402 ausgebildet.

Nach Schritt A wird die in **Fig. 4A** gezeigte Schichtstruktur 400 erhalten. Die elektrisch isolierende Schicht 401 ist eine Siliziumnitrid-Schicht oder alternativ eine Siliziumdioxid-Schicht, und das Substrat 402 ist ein Silizium-Wafer oder  
5 alternativ ein Glas-Substrat.

In einem Schritt A nachfolgenden Schritt D wird ein Graben 403 in einen Oberflächenbereich der Schichtanordnung 400  
10 geätzt.

Das Einbringen des Grabens 403 in die elektrisch isolierende Schicht 401 auf der Oberfläche des Substrats 402 wird durch Photostrukturieren und anschließendes Ätzen der Oberfläche  
15 der Schichtstruktur 400 realisiert. Nach Durchführung des auf den Schritt A folgenden Schrittes D wird die in **Fig. 4B** gezeigte Schichtanordnung 404 erhalten.

In einem auf den oben beschriebenen Schritt D nachfolgenden Schritt B wird eine Katalysatorschicht 405 auf der Oberfläche der Schichtanordnung 404 aufgebracht, wobei die Katalysatorschicht 405 einen oder mehrere Teilbereiche aufweist.

25 Gemäß der in **Fig. 4C** dargestellten Schichtanordnung 406, die nach Durchführen des Schrittes B erhalten wird, weist die Katalysatorschicht 405 fünf Teilbereiche auf. Der als Schritt B bezeichnete Verfahrensschritt weist bei der praktischen Realisierung üblicherweise mehrere Teilschritte auf. In einem  
30 ersten Teilschritt wird auf der gesamten Oberfläche der Schichtstruktur 404 eine Katalysatorschicht 405 aufgebracht. Beispielsweise wird eine ungefähr 20 nm dicke Nickel-Schicht auf der Oberfläche der Schichtstruktur 404 abgeschieden. In einem zweiten Teilschritt des Schrittes B wird die  
35 Katalysatorschicht 405 mittels eines geeigneten Lithographieverfahrens, beispielsweise mittels Elektronenstrahlolithographie, derart strukturiert, dass auf



der Oberfläche der Schichtanordnung 404 ein oder mehrere Teilbereiche zurückbleiben. Bezugnehmend auf **Fig. 4C** bleiben nach diesem Teilschritt fünf Teilbereiche der Katalysatorschicht 405 auf der Oberfläche der Schichtstruktur zurück. Vorzugsweise wird die Katalysatorschicht 405 zu Drähten von ungefähr 20 nm Breite strukturiert. Wie in der Querschnittsansicht von **Fig. 4C** gezeigt, bleibt nach dem Photostrukturieren Material der Katalysatorschicht 405 nur in einem links des Grabens 403 angeordneten Bereich auf der Oberfläche der Schichtstruktur 406 zurück.

In einem nachfolgenden Schritt C wird eine weitere elektrisch isolierende Schicht 407 auf mindestens einen Teil der Oberfläche der Schichtanordnung 406 aufgebracht, derart, dass die weitere elektrisch isolierende Schicht 407 mindestens einen der Teilbereiche der Katalysatorschicht 405 mindestens teilweise bedeckt.

Auch der als Schritt C bezeichnete Verfahrensschritt weist mehrere Teilschritte auf. In einem ersten Teilschritt wird auf die Oberfläche der Schichtstruktur 406 eine Photolack-Schicht abgesetzt. In einem zweiten Teilschritt wird ein Lithographieverfahren mit einer geeigneten Maske verwendet, um die Oberfläche der mit dem Photolack bedeckten Schichtanordnung 406 zu strukturieren. In einem weiteren Teilschritt wird eine weitere elektrisch isolierende Schicht 407, beispielsweise aus Siliziumnitrid-Material oder aus Siliziumdioxid-Material, mittels eines geeigneten halbleitertechnologischen Verfahrens, beispielsweise durch Sputtern oder Verdampfen, auf der Oberfläche der mit Photolack versehenen und photostrukturierten Schichtanordnung 406 abgesetzt. In einem weiteren Teilschritt wird unter Verwendung eines Lift-Off-Verfahrens die aus der Photolack-Schicht und der elektrisch isolierenden Schicht 407 zusammengesetzte Doppelschicht von einem Teilbereich der Oberfläche der Schichtanordnung entfernt. Zurück bleibt eine Schichtanordnung, die sich von der in **Fig. 4C** dargestellten

Schichtanordnung 406 im Wesentlichen dadurch unterscheidet, dass die weitere elektrisch isolierende Schicht 407 in einem gemäß der Querschnittsansicht der Schichtanordnung links der linken Grenze des Grabens 403 befindlichen Oberflächenbereich  
5 der Schichtanordnung zurückbleibt.

In einem nachfolgenden Verfahrensschritt E wird die Katalysatorschicht 405 teilweise zurückgeätzt, derart, dass die elektrisch isolierende Schicht 401 und die weitere  
10 elektrisch isolierende Schicht 407 seitlich über die Katalysatorschicht 405 hinausstehen, so dass eine Pore 408 erzeugt wird, durch welche die zur Oberfläche des Substrats 402 parallele Aufwachsrichtung der Nanoröhre vorgegeben wird.

15 Nach Durchführen des Verfahrensschrittes E wird die in **Fig. 4D** gezeigte Schichtanordnung 409 erhalten. Schritt E kann dadurch realisiert werden, dass die Katalysatorschicht 405 nasschemisch zurückgeätzt wird und dadurch Poren 408 ausgebildet werden. Beispielsweise wird eine aus Nickel  
20 hergestellte Katalysatorschicht 405 mittels eines nasschemischen Ätzverfahrens zurückgeätzt. Wie oben ausgeführt, ist das Ausbilden von Poren 408 zum Definieren der Aufwachsrichtung einer Nanoröhre, des Durchmessers einer Nanoröhre und der Erzeugung einer geordneten Struktur von  
25 Nanoröhren essentiell.

In einem nachfolgenden Verfahrensschritt F wird mindestens eine Nanoröhre 410 auf einem freiliegenden Teil der Oberfläche eines Teilbereichs der Katalysatorschicht 405  
30 aufgewachsen, derart, dass die mindestens eine Nanoröhre 410 parallel zur Oberfläche der Schichtanordnung 409 angeordnet ist.

Nach Durchführung des Verfahrensschrittes F wird die in **Fig. 4E** gezeigte Schichtanordnung 411 erhalten. Die Herstellung von Nanoröhren 410 kann beispielsweise mittels des Verfahrens

der Gasphasenepitaxie erfolgen, welches Verfahren aus dem Stand der Technik bekannt ist.

Ferner kann das beschriebene Verfahren zur Herstellung einer  
5 Nanoröhren-Anordnung den weiteren Schritt aufweisen, dass  
zwischen mindestens einem Teilbereich der Katalysatorschicht  
405 und die daran angrenzenden Schichten 401, 407 eine  
Schicht zur Verhinderung von Diffusion (nicht gezeigt in den  
Figuren) eingebracht wird. Dadurch kann verhindert werden,  
10 dass das Material der Katalysatorschicht 405 beispielsweise  
infolge thermischer Einflüsse in siliziumaufweisende Bereiche  
eines möglicherweise angeschlossenen externen Schaltkreises  
(nicht gezeigt in den Figuren) eindiffundiert. Die Schicht  
zur Verhinderung von Diffusion (in Fig. 1F mit der  
15 Bezugsziffer 107 versehen) wird vorzugsweise aus Tantalnitrid  
hergestellt.

Die elektrisch isolierende Schicht 401 und/oder die weitere  
elektrisch isolierende Schicht 407 werden voneinander  
20 unabhängig aus einem oder einer Kombination der Materialien  
Siliziumnitrid und Siliziumdioxid hergestellt.

Die Katalysatorschicht 405 wird vorzugsweise aus einem oder  
einer Kombination der Materialien Nickel, Eisen und Kobalt  
25 hergestellt. Alternativ kann für die Herstellung der  
Katalysatorschicht 405 jedes andere katalytisch aktive  
Material verwendet werden.

Die auf die Schichtanordnung 409 aufzuwachsenden Nanoröhren  
30 410 sind gemäß diesem Ausführungsbeispiel  
Kohlenstoffnanoröhren.

Im Weiteren wird ein weiteres Ausführungsbeispiel des  
erfindungsgemäßen Verfahrens zum Herstellen einer Nanoröhren-  
35 Anordnung beschrieben, das auf die Verwendung der  
verfahrensgemäß hergestellten Nanoröhren-Anordnung als  
Gassensor zugeschnitten ist.

Das im Weiteren beschriebene Verfahren zur Herstellung des Gassensors wird bezugnehmend auf Fig. 5A, Fig. 5B, Fig. 5C, Fig. 5D beschrieben.

5

In einem ersten Schritt A wird eine Schichtanordnung 504 durch Aufbringen einer elektrisch isolierenden Schicht 501, 502 auf einem Substrat 503 ausgebildet.

- 10 Nach Ausführen des Schrittes A wird die Schichtanordnung 504 erhalten, die in Fig. 5B dargestellt ist. Schritt A weist mehrere Teilschritte auf. In einem ersten Teilschritt wird auf beiden Hauptseiten eines Substrats 503 jeweils eine elektrisch isolierende Schicht aufgebracht. In Fig. 5A sind
- 15 diese beiden Schichten als erste elektrisch isolierende Schicht 501 und als zweite elektrisch isolierende Schicht 502 bezeichnet. Das Substrat 503 ist vorzugsweise ein Silizium-Wafer, die erste elektrisch isolierende Schicht 501 und/oder die zweite elektrisch isolierende Schicht 502 werden
- 20 vorzugsweise aus Siliziumnitrid-Material oder alternativ aus Siliziumdioxid-Material hergestellt. Es ist auch möglich, dass die erste isolierende Schicht 501 und die zweite elektrisch isolierende Schicht 502 aus verschiedenen Materialien hergestellt werden. Um das Substrat 502 zu
- 25 strukturieren, wird in einem nächsten Teilschritt zunächst die auf einer Hauptseite des Substrats 503 aufgebrachte elektrisch isolierende Schicht 501 mittels eines geeigneten halbleitertechnologischen Verfahrens derart strukturiert, dass in einem Mittenbereich der Schichtanordnung 500 ein
- 30 Oberflächenbereich des Substrates 503 freigelegt wird. Anschaulich wird in die erste elektrisch isolierende Schicht 501 ein Loch, beispielsweise im Wesentlichen kreis- oder rechteckförmig, geätzt. In einem nächsten Teilschritt wird ein geeignetes Ätzverfahren auf die Schichtstruktur
- 35 angewendet um das Material des Substrats 503 von dem Mittenbereich der Anordnung zu entfernen, in dem zuvor durch das Ätzverfahren ein Teil der Oberfläche des Substrates

freigelegt wurde. Hierzu ist ein Ätzverfahren anzuwenden, bei dem die verwendeten Ätzchemikalien so auszuwählen sind, dass diese das Material des Substrats 503 ätzen, wohingegen die Materialien der ersten elektrisch isolierenden Schicht 501 sowie der zweiten elektrisch isolierenden Schicht 502 durch die Ätzchemikalie nicht angegriffen werden. Nach Durchführen der beschriebenen Teilschritte wird die in **Fig. 5A** gezeigte Schichtanordnung 500 erhalten. In einem nächsten Teilschritt wird die erste elektrisch isolierende Schicht 501 von der Oberfläche der Schichtstruktur 500 entfernt, wodurch die in **Fig. 5B** gezeigte Schichtstruktur 504 erhalten wird. Dies kann beispielsweise mittels eines geeigneten Ätzverfahrens realisiert werden.

Die im Folgenden beschriebenen Verfahrensschritte werden vorwiegend auf derjenigen Hauptseite der zweiten elektrisch isolierenden Schicht 502 vorgenommen, die dem Substrat 503 abgewandt ist. Um dies zeichnerisch kenntlich zu machen, ist in **Fig. 5B** die Schichtanordnung 504 gegenüber der Schichtanordnung 500 aus **Fig. 5A** um einen Winkel von  $180^\circ$  gedreht.

In einem Schritt B wird eine Katalysatorschicht 505 auf der Oberfläche der Schichtanordnung 504 aufgebracht, wobei die Katalysatorschicht 505 einen oder mehrere Teilbereiche aufweist.

Die Schichtstruktur, wie sie nach Durchführung des Schrittes B erhalten wird, ist in den Figuren nicht gezeigt. Der Verfahrensschritt B wird realisiert, indem zunächst eine die Oberfläche der Schichtstruktur 504 vollständig bedeckende Katalysatorschicht 505 aufgebracht wird und diese Katalysatorschicht 505 dann mittels eines geeigneten halbleitertechnologischen Verfahrens, beispielsweise mittels des Elektronenstrahlolithographie-Verfahrens, strukturiert wird. Beispielsweise kann eine Eisen-Schicht oder eine Kobalt-Schicht oder eine Nickel-Schicht oder eine Schicht aus

einem beliebigen anderen, das Wachstum von Nanoröhren katalysierenden Material aufgebracht werden, und unter Verwendung des Elektronenstrahlolithographie-Verfahrens zu Drähten von beispielsweise 20 nm Dicke strukturiert werden.

5 Die einzelnen Teilbereiche der Katalysatorschicht 505 sind aus den Querschnittsansichten von Fig. 5C, Fig. 5D nicht ersichtlich.

In einem nachfolgenden Verfahrensschritt C wird eine weitere  
10 elektrisch isolierende Schicht 506 auf mindestens einen Teil der Oberfläche der Schichtanordnung aufgebracht, derart, dass die weitere elektrisch isolierende Schicht 506 mindestens einen der Teilbereiche der Katalysatorschicht 505 mindestens teilweise bedeckt.

15 Der Verfahrensschritt C wird realisiert, indem zunächst eine die gesamte Oberfläche der Schichtanordnung bedeckende weitere elektrisch isolierende Schicht 506 aufgebracht wird und diese mittels eines geeigneten halbleitertechnologischen  
20 Verfahrens strukturiert wird. Beispielsweise ist die weitere elektrisch isolierende Schicht 506 eine Siliziumdioxid-Schicht, alternativ kann die weitere elektrisch isolierende Schicht 506 eine Siliziumnitrid-Schicht sein, die dann beispielsweise mittels eines Photolithographie-Verfahrens  
25 strukturiert wird.

In dem nächsten Verfahrensschritt D wird ein Graben 507 in einen Oberflächenbereich der Schichtanordnung geätzt.

30 Dieser Schritt wird praktisch umgesetzt, indem die Oberfläche der Schichtanordnung beispielsweise unter Verwendung eines Photolithographieverfahrens strukturiert wird.

In einem Verfahrensschritt E wird die Katalysatorschicht 505  
35 teilweise zurückgeätzt, derart, dass die elektrisch isolierende Schicht 502 und die weitere elektrisch isolierende Schicht 506 seitlich über die Katalysatorschicht

505 hinausstehen, so dass eine Pore 508 erzeugt wird, durch welche die zur Oberfläche des Substrats 503 parallele Aufwachsrichtung der Nanoröhre vorgegeben wird.

- 5    Dadurch wird die Schichtstruktur 509 erhalten, die in Fig. 5C gezeigt ist. Der Verfahrensschritt E kann realisiert werden, indem die Katalysatorschicht 505 nasschemisch zurückgeätzt wird, um so eine Pore 508 zu erzeugen.
- 10   Um die verfahrensgemäß hergestellte Nanoröhren-Anordnung als Gassensor verwenden zu können (verwendungsgemäß soll ein möglichst großer Teil der Oberfläche der Nanoröhre freiliegen), weist das beschriebene Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Herstellungsverfahrens einige
- 15   Besonderheiten auf. Da die in einem weiteren Verfahrensschritt aufzubringende Nanoröhre mit einer umgebenden Gasatmosphäre in Wirkkontakt geraten muss, so dass sich infolge des Wirkkontakts der elektrische Widerstand der Nanoröhre in für das umgebende Gas charakteristischer Weise
- 20   verändert, muss bei dem hergestellten Gassensor die mindestens eine Nanoröhre in einem möglichst großen Oberflächenbereich freiliegen, d.h. dem umgebenden Gas ausgesetzt sein. Um dies zu realisieren, wird in einem Zwischenverfahrensschritt E1 die zweite elektrisch
- 25   isolierende Schicht 502 auf ihrer dem Substrat 503 zugewandten Hauptseite der zweiten elektrisch isolierenden Schicht in einem Mittenbereich teilweise zurückgeätzt. Dadurch wird die in Fig. 5D veranschaulichte Nut 510
- 30   ausgebildet, die in die zweite elektrisch isolierende Schicht 502 ausreichend tief eingebracht wird, um gemeinsam mit dem Graben 507 ein Durchgangsloch durch die zweite elektrisch isolierende Schicht 502 zu erzeugen.

- In einem nachfolgenden Verfahrensschritt F wird dann
- 35   mindestens eine Nanoröhre 511 auf einem freiliegenden Teil der Oberfläche eines Teilbereichs der Katalysatorschicht 505

aufgewachsen, derart, dass die mindestens eine Nanoröhre 511 parallel zur Oberfläche der Schichtanordnung angeordnet wird.

Die Herstellung der Nanoröhren 511 erfolgt beispielsweise durch Verwendung des Gasphasenepitaxie-Verfahrens. Indem die zweite elektrisch isolierende Schicht 502 (gemäß Fig. 5D von unten her) und die weitere elektrisch isolierende Schicht 506 (gemäß Fig. 5D von oben her) über die Katalysatorschicht 505 beidseitig seitlich hinausstehen, wird eine Pore 508 ausgebildet. Das Wachstum der Nanoröhren 511 kann nur von der Oberfläche einer katalytisch aktiven Schicht ausgehen. Daher kann das Wachstum der mindestens einen Nanoröhre 511 nur aus der Pore 508 heraus, ausgehend von der freiliegenden Oberfläche der Katalysatorschicht 505, erfolgen. Da die Aufwachsrichtung durch die kanalartige Schablone, die durch die zweite elektrisch isolierende Schicht 502 und die weitere elektrisch isolierende Schicht 506 ausgebildet wird, vorgegeben werden kann, ist die Aufwachsrichtung der Nanoröhre 511 festlegbar. Daher ist es erfindungsgemäß ermöglicht, dass die in Fig. 5D gezeigte Nanoröhre 511 nur in horizontaler Richtung aufwachsen kann, d.h. in einer Richtung parallel zur Oberfläche des Substrats 503. Durch die Dicke der Katalysatorschicht 505 ist der Durchmesser der Nanoröhre 511 vorgebbbar. Dadurch sind durch geeignete Wahl der Dicke der Katalysatorschicht 505 einzelne Nanoröhren 511 aufwachsbar.

Um die Nanoröhren-Anordnung der Erfindung als Gassensor zu verwenden, ist ein weiterer Zusatzschritt erforderlich. Denn die Verwendung der Nanoröhren-Anordnung als Gassensor setzt voraus, dass eine physikalische Größe der Nanoröhre, die auf eine umgebende Gasatmosphäre sensitiv ist, erfasst wird. Wie oben beschrieben, ist insbesondere der elektrische Widerstand einer Nanoröhre ein empfindliches Maß für die Art und die Konzentration eines umgebenden Gases. Daher muss der elektrische Widerstand der Nanoröhre 511 erfasst werden, und hierfür ist die als Gassensor zu verwendende Nanoröhren-



Anordnung an ein Mittel zum Erfassen des elektrischen Widerstandes (nicht gezeigt in den Figuren) anzukoppeln. Hierzu muss die mindestens eine Nanoröhre 511 beidseitig elektrisch kontaktiert werden, wobei über diese elektrischen Kontaktierungen dann eine Kopplung an das Mittel zum Erfassen des elektrischen Widerstandes erfolgen kann. Daher muss in einem weiteren Zusatzschritt der freiliegende Endabschnitt 511a der Nanoröhre 511, der nicht mit der Katalysatorschicht 505 gekoppelt ist, elektrisch kontaktiert werden. Hierzu wird eine elektrisch leitfähige elektrische Kontaktierung 512 auf die Schichtstruktur aufgebracht, um mit dem freiliegenden Endabschnitt 511a der Nanoröhre 511 gekoppelt zu werden. Die resultierende Schichtstruktur 513 ist in **Fig. 5D** gezeigt. Nicht in **Fig. 5D** gezeigt ist die elektrische Kontaktierung des anderen Endabschnittes 511b der Nanoröhre 511, die mit der Katalysatorschicht 505 gekoppelt ist. Auch dieser andere Endabschnitt 511b der Nanoröhre 511, das mit der Katalysatorschicht 505 gekoppelt ist, muss elektrisch kontaktiert werden, um zwischen den beiden Endabschnitten 511a, 511b der Nanoröhre 511 den elektrischen Widerstand der Nanoröhre 511 erfassen zu können.

Nach Durchführen dieser Verfahrensschritte wird die in **Fig. 5D** gezeigte Schichtstruktur 513 erhalten, die als Gassensor verwendet werden kann. Es ist zu betonen, dass die Verwendung der Nanoröhren-Anordnung der Erfindung als Gassensor nicht auf das in **Fig. 5D** gezeigte Ausführungsbeispiel beschränkt ist. Beispielsweise können mehrere Nanoröhren 511 elektrisch in Reihe geschaltet werden, um den Wert des zu erfassenden Gesamtwiderstandes zu erhöhen, und um so die Empfindlichkeit der Gassensor-Anordnung zu erhöhen. Alternativ können auch mehrere Nanoröhren 511 parallel geschaltet werden, um separat für jede Nanoröhre deren elektrischen Widerstand zu erfassen, und so über eine Mehrfachmessung eine Erhöhung der Nachweisgenauigkeit zu erreichen. Auch kann ein Teil der Nanoröhren 511 parallel und ein anderer Teil der Nanoröhren 511 in Serie geschaltet werden. Ferner ist die Funktionsweise

der Nanoröhren-Anordnung als Gassensor nicht darauf  
beschränkt, dass der elektrische Widerstand der Nanoröhre 511  
erfasst wird. Es kann auch jeder andere physikalische  
Parameter der Nanoröhre 511, der auf eine zu erfassende  
5 physikalische Größe sensitiv ist, auf eine andere Weise als  
elektrisch gemessen werden.

In diesem Dokument sind folgende Veröffentlichungen zitiert:

- [1] Harris, PJF (1999) „Carbon Nanotubes and Related  
Structures - New Materials for the Twenty-first  
5 Century.“, Cambridge University Press, Cambridge
- [2] Dekker, C et al. (1999) "Carbon Nanotubes as Molecular  
Quantum Wires", Physics Today 5/99:22-28
- 10 [3] Kong, J et al. (2000) „Nanotube Molecular Wires as  
Chemical Sensors" Science 287:622-625
- [4] Fan, S et al. (1999) „Self-Ordered regular arrays of  
carbon-nanotubes and their field emission properties"  
15 Science 283:512-514
- [5] Suh, JS et al. (1999) "Highly ordered two dimensional  
carbon nanotube arrays" ApplPhysLett 75/14:2047-2049
- 20 [6] Soh, HT, Quate, CF, Morpurgo, AF, Marcus, CM, Kong, J,  
Dai, H (1999) "Integrated nanotube circuits:  
Controlled growth and ohmic contacting of single-  
walled carbon nanotubes" Applied Physics Letters  
75(5):627-629

## Bezugszeichenliste

- 100 Nanoröhren-Anordnung
- 101 Substrat
- 102 Katalysatorschicht
- 103 Nanoröhre
- 103a Endabschnitt der Nanoröhre
- 103b Mittenabschnitt der Nanoröhre
- 104 elektrisch isolierende Schicht
- 105 Schaltkreiseinrichtung
- 106 weitere elektrisch isolierende Schicht
- 107 Schicht zur Verhinderung von Diffusion
- 108 Anschlusselektrode
- 110 Nanoröhren-Anordnung
- 120 Nanoröhren-Anordnung
- 200 Gassensor
- 201 strukturiertes Substrat
- 202 elektrisch isolierende Schicht
- 203 elektrisch leitfähige Katalysatorschicht
- 204 weitere elektrisch isolierende Schicht
- 205 Kohlenstoffnanoröhre
- 205a Mittenabschnitt der Nanoröhre
- 205b Endabschnitt der Nanoröhre
- 206 Elektrode
- 300 Schichtanordnung
- 301 elektrisch isolierende Schicht
- 302 Substrat
- 303 Katalysatorschicht
- 304 Schichtanordnung
- 305 weitere elektrisch isolierende Schicht
- 306 Schichtanordnung
- 307 Schichtanordnung
- 308 Graben
- 309 Schichtanordnung
- 310 Pore

311 Schichtanordnung  
312 Nanoröhre  
313 Schichtanordnung  
400 Schichtanordnung  
401 elektrisch isolierende Schicht  
402 Substrat  
403 Graben  
404 Schichtanordnung  
405 Katalysatorschicht  
406 Schichtanordnung  
407 weitere elektrisch isolierende Schicht  
408 Pore  
409 Schichtanordnung  
410 Nanoröhre  
411 Schichtanordnung  
412 Nanoröhre  
413 Schichtanordnung  
500 Schichtanordnung  
501 erste elektrisch isolierende Schicht  
502 zweite elektrisch isolierende Schicht  
503 Substrat  
504 Schichtanordnung  
505 Katalysatorschicht  
506 weitere elektrisch isolierende Schicht  
507 Graben  
508 Pore  
509 Schichtanordnung  
510 Nut  
511 Nanoröhre  
511a Endabschnitt der Nanoröhre  
511b anderer Endabschnitt der Nanoröhre  
512 elektrische Kontaktierung  
513 Schichtstruktur

## Patentansprüche

### 1. Nanoröhren-Anordnung

- mit einem Substrat;
- 5 • mit einer Katalysatorschicht, die einen oder mehrere Teilbereiche aufweist, auf der Oberfläche des Substrats;
- mit mindestens einer parallel zur Oberfläche des Substrats auf der Oberfläche der Katalysatorschicht angeordneten Nanoröhre;
- 10 • mit einer Pore, wobei mittels der Pore die Aufwachsrichtung der Nanoröhre ausgehend von der Katalysatorschicht und parallel zur Oberfläche des Substrats vorgegeben ist.

- 15 2. Nanoröhren-Anordnung nach Anspruch 1, ferner aufweisend eine elektrisch isolierende Schicht zwischen dem Substrat und der Katalysatorschicht.

- 20 3. Nanoröhren-Anordnung nach Anspruch 2, bei der die elektrisch isolierende Schicht eine derartige Topographie aufweist, dass die mindestens eine Nanoröhre in ihren Endabschnitten auf der elektrisch isolierenden Schicht aufliegt und in ihrem Mittenabschnitt frei liegt.

- 25 4. Nanoröhren-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, bei der die Teilbereiche der Katalysatorschicht voneinander entkoppelt sind und/oder bei der die Nanoröhren voneinander entkoppelt sind.

- 30 5. Nanoröhren-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, ferner aufweisend eine Schaltkreiseinrichtung, mittels derer die Nanoröhren einzeln ansteuerbar und/oder auslesbar sind.

- 35 6. Nanoröhren-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, bei der ferner mindestens einer der Teilbereiche der Katalysatorschicht zumindest teilweise von einer weiteren elektrisch isolierenden Schicht umgeben ist.

7. Nanoröhren-Anordnung nach Anspruch 6, bei der die elektrisch isolierende Schicht und die weitere elektrisch isolierende Schicht, zwischen denen die Katalysatorschicht  
5 angeordnet ist, seitlich über die Katalysatorschicht hinausstehen, um so die Pore auszubilden, durch welche die zur Oberfläche des Substrats parallele Aufwuchsrichtung der Nanoröhre vorgebar ist.

10 8. Nanoröhren-Anordnung nach Anspruch 7, bei der die elektrisch isolierende Schicht und/oder die weitere elektrisch isolierende Schicht aus einem oder einer Kombination der Materialien Siliziumnitrid und Siliziumdioxid hergestellt ist.

15

9. Nanoröhren-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, bei der ferner mindestens einer der Teilbereiche der Katalysatorschicht zumindest teilweise von einer Schicht zur Verhinderung von Diffusion umgeben ist.

20

10. Nanoröhren-Anordnung nach Anspruch 9, bei der die Schicht zur Verhinderung von Diffusion aus Tantalnitrid hergestellt ist.

25 11. Nanoröhren-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, bei der die Katalysatorschicht aus einem oder einer Kombination der Materialien Nickel, Eisen und Kobalt hergestellt ist.

30 12. Nanoröhren-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 11, bei der die Teilbereiche der Katalysatorschicht zueinander parallel angeordnet sind.

13. Nanoröhren-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 12,  
35 bei der die Anordnung als Gassensor verwendet wird.

14. Nanoröhren-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 13, ferner aufweisend ein in das Substrat integriertes Mittel zum Erfassen des elektrischen Widerstandes der mindestens einen Nanoröhre.

5

15. Nanoröhren-Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 14, bei der die Nanoröhren Kohlenstoffnanoröhren sind.

10

16. Verfahren zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung, bei dem

B: eine Katalysatorschicht auf der Oberfläche der Schichtanordnung aufgebracht wird, wobei die Katalysatorschicht einen oder mehrere Teilbereiche aufweist;

15

F: mindestens eine Nanoröhre auf einem freiliegenden Teil der Oberfläche eines Teilbereichs der Katalysatorschicht aufgewachsen wird, derart, dass die mindestens eine Nanoröhre parallel zur Oberfläche der Schichtanordnung angeordnet wird, wobei mittels einer Pore die Aufwachsrichtung der Nanoröhre ausgehend von der Katalysatorschicht und parallel zur Oberfläche des Substrats vorgegeben wird.

20

17. Verfahren nach Anspruch 16, bei dem ferner

25

A: die Schichtanordnung durch Aufbringen einer elektrisch isolierenden Schicht auf einem Substrat ausgebildet wird.

18. Verfahren nach Anspruch 16 oder 17, bei dem ferner

30

C: eine weitere elektrisch isolierende Schicht auf mindestens einen Teil der Oberfläche der Schichtanordnung aufgebracht wird, derart, dass die weitere elektrisch isolierende Schicht mindestens einen der Teilbereiche der Katalysatorschicht mindestens teilweise bedeckt.

35



19. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 18, bei dem ferner

D: ein Grabens in einen Oberflächenbereich der Schichtanordnung geätzt wird.

5

20. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 19, bei dem ferner

E: die Katalysatorschicht teilweise zurückgeätzt wird, derart, dass die elektrisch isolierende Schicht und die weitere elektrisch isolierende Schicht seitlich über die Katalysatorschicht hinausstehen, wodurch die Pore erzeugt wird, durch welche die zur Oberfläche des Substrats parallele Aufwachsrichtung der Nanoröhre vorgegeben wird.

10

15

21. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 20, bei dem in dieser Reihenfolge

A: eine Schichtanordnung durch Aufbringen einer elektrisch isolierenden Schicht auf einem Substrat ausgebildet wird;

20

B: eine Katalysatorschicht auf der Oberfläche der Schichtanordnung aufgebracht wird, wobei die Katalysatorschicht einen oder mehrere Teilbereiche aufweist;

25

C: eine weitere elektrisch isolierende Schicht auf mindestens einen Teil der Oberfläche der Schichtanordnung aufgebracht wird, derart, dass die weitere elektrisch isolierende Schicht mindestens einen der Teilbereiche der Katalysatorschicht mindestens teilweise bedeckt;

30

D: ein Grabens in einen Oberflächenbereich der Schichtanordnung geätzt wird;

E: die Katalysatorschicht teilweise zurückgeätzt wird, derart, dass die elektrisch isolierende Schicht und die weitere elektrisch isolierende Schicht seitlich über die Katalysatorschicht hinausstehen, wodurch die Pore erzeugt wird, durch welche die zur Oberfläche des

35

Substrats parallele Aufwuchsrichtung der Nanoröhre vorgegeben wird;

F: mindestens eine Nanoröhre auf einem freiliegenden Teil der Oberfläche eines Teilbereichs der Katalysatorschicht aufgewachsen wird, derart, dass die mindestens eine Nanoröhre parallel zur Oberfläche der Schichtanordnung angeordnet wird.

22. Verfahren nach Anspruch 21, bei dem die Reihenfolge der Schritt D nach Schritt A und vor Schritt B ausgeführt wird.

23. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 22, bei dem ferner zwischen mindestens einen Teilbereich der Katalysatorschicht und die an den mindestens einen Teilbereich der Katalysatorschicht angrenzenden Schichten zumindest teilweise mindestens eine Schicht zur Verhinderung von Diffusion eingebracht wird.

24. Verfahren nach einem der Ansprüche 18 bis 23, bei dem die elektrisch isolierende Schicht und/oder die weitere elektrisch isolierende Schicht aus einem oder einer Kombination der Materialien Siliziumnitrid und Siliziumdioxid hergestellt wird.

25. Verfahren nach Anspruch 23 oder 24, bei dem die Schicht zur Verhinderung von Diffusion aus Tantalnitrid hergestellt wird.

26. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 25, bei dem die Katalysatorschicht aus einem oder einer Kombination der Materialien Nickel, Eisen und Kobalt hergestellt wird.

27. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 26, bei dem die Katalysatorschicht, die einen oder mehrere Teilbereiche aufweist, auf der Oberfläche der Schichtanordnung aufgebracht wird, indem zunächst eine Schicht von Katalysatormaterial

aufgebracht wird und diese dann mittels  
Elektronenstrahllithographie strukturiert wird.

28. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 27, bei dem die  
5 mindestens eine Nanoröhre auf einem freiliegenden Teil der  
Oberfläche eines Teilbereichs der Katalysatorschicht mittels  
Gasphasenepitaxie aufgewachsen wird.

29. Verfahren nach einem der Ansprüche 16 bis 28, bei dem die  
10 mindestens eine Nanoröhre eine Kohlenstoffnanoröhre ist.

1/10

FIG 1A

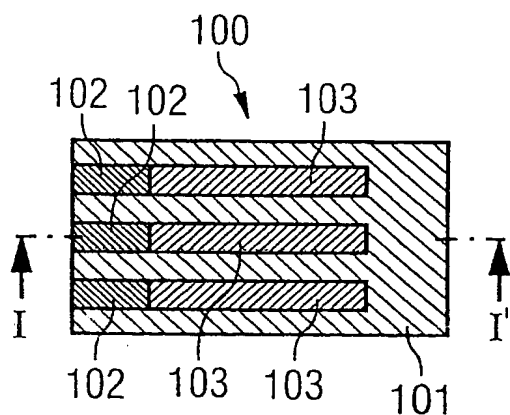


FIG 1B

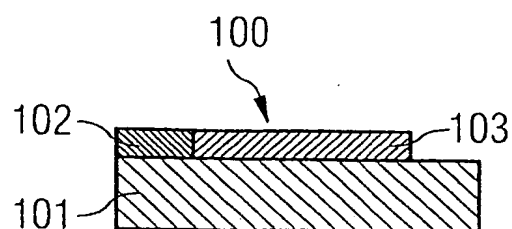


FIG 1C

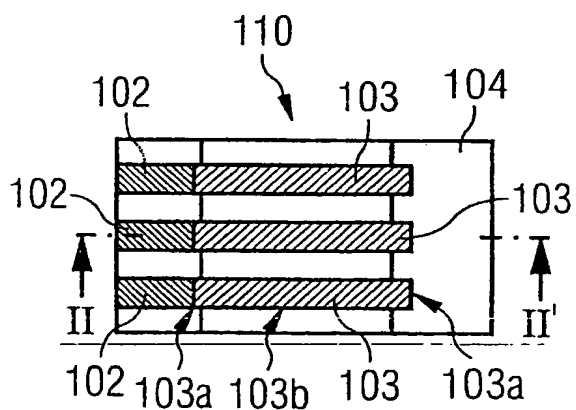


FIG 1D

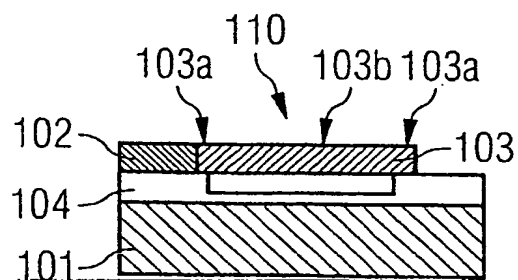


FIG 1E

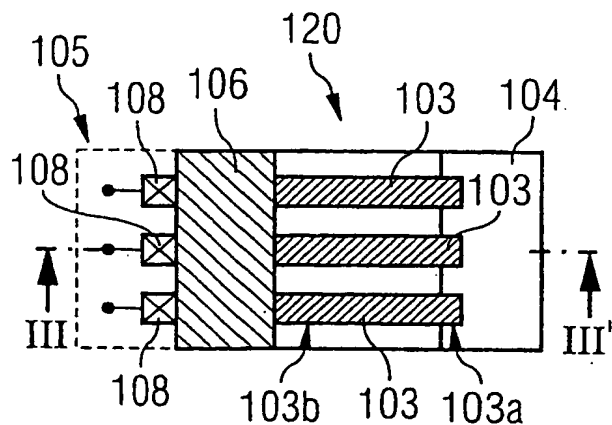
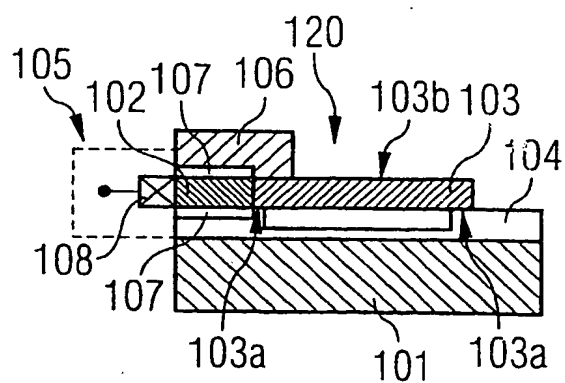
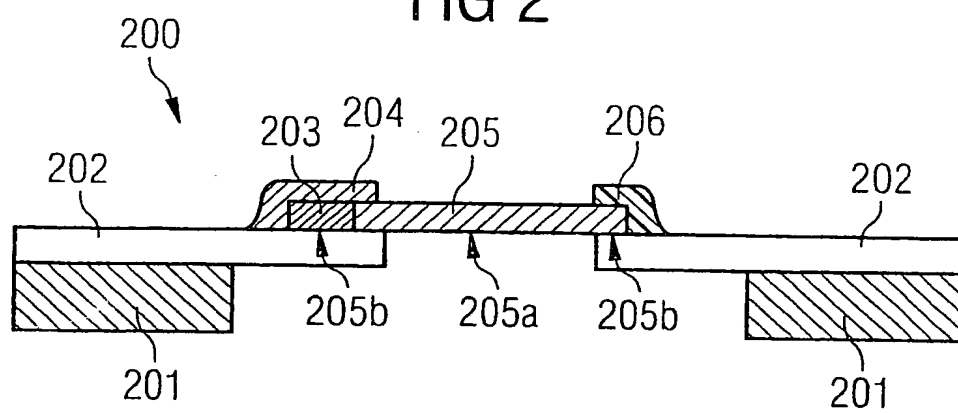


FIG 1F



2/10

FIG 2



3/10

FIG 3A

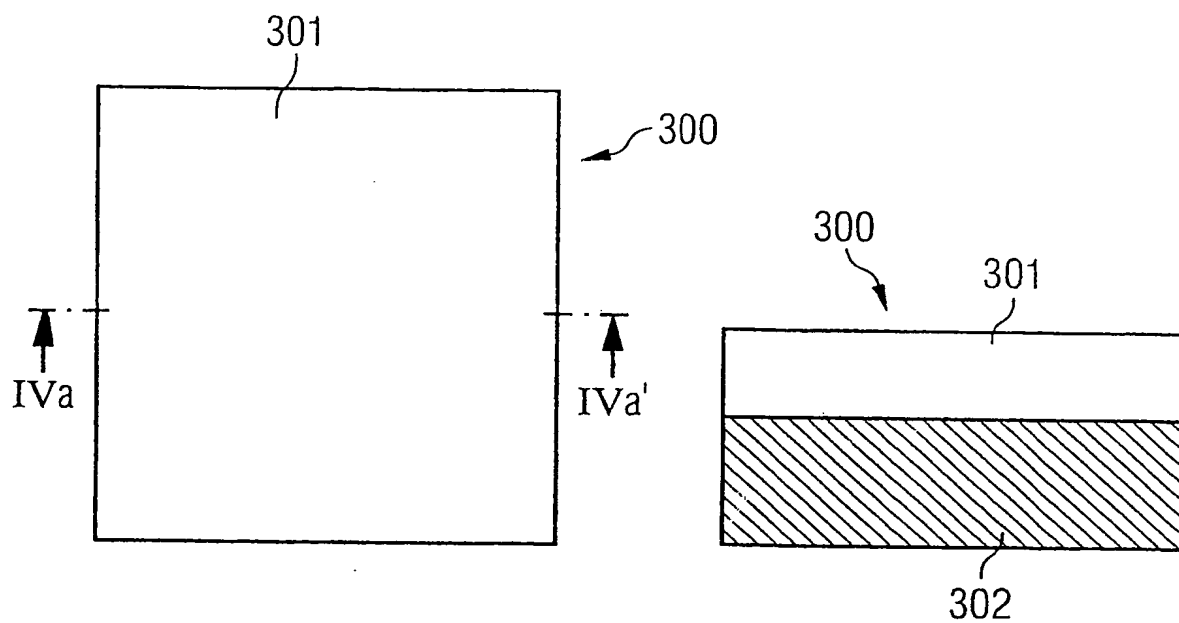
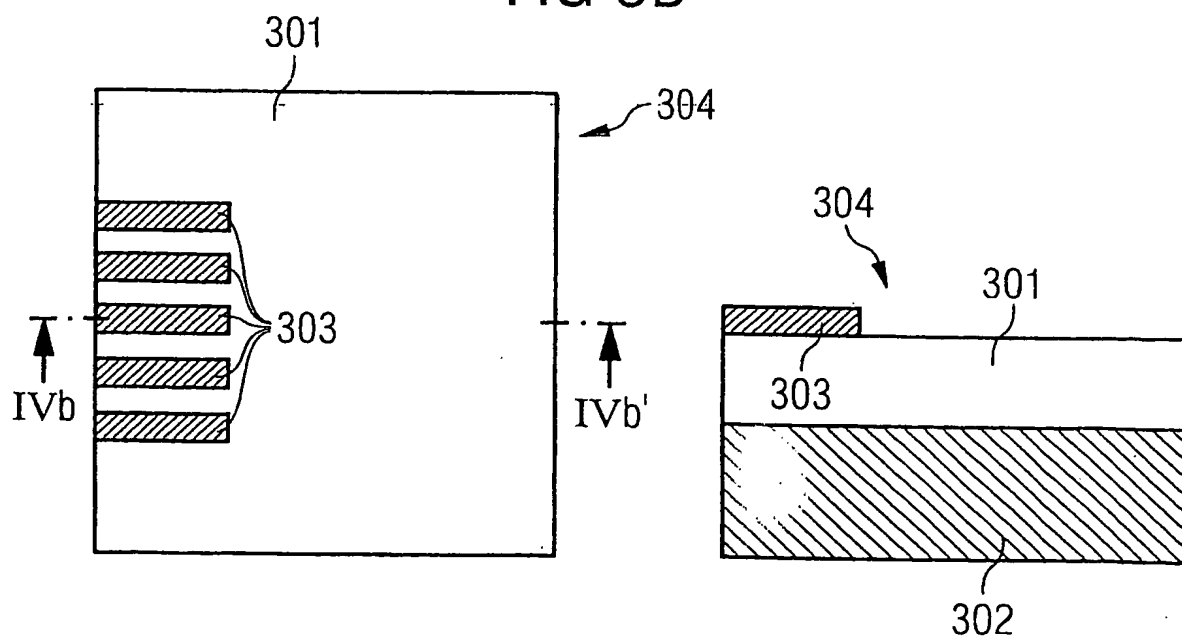


FIG 3B



4/10

FIG 3C

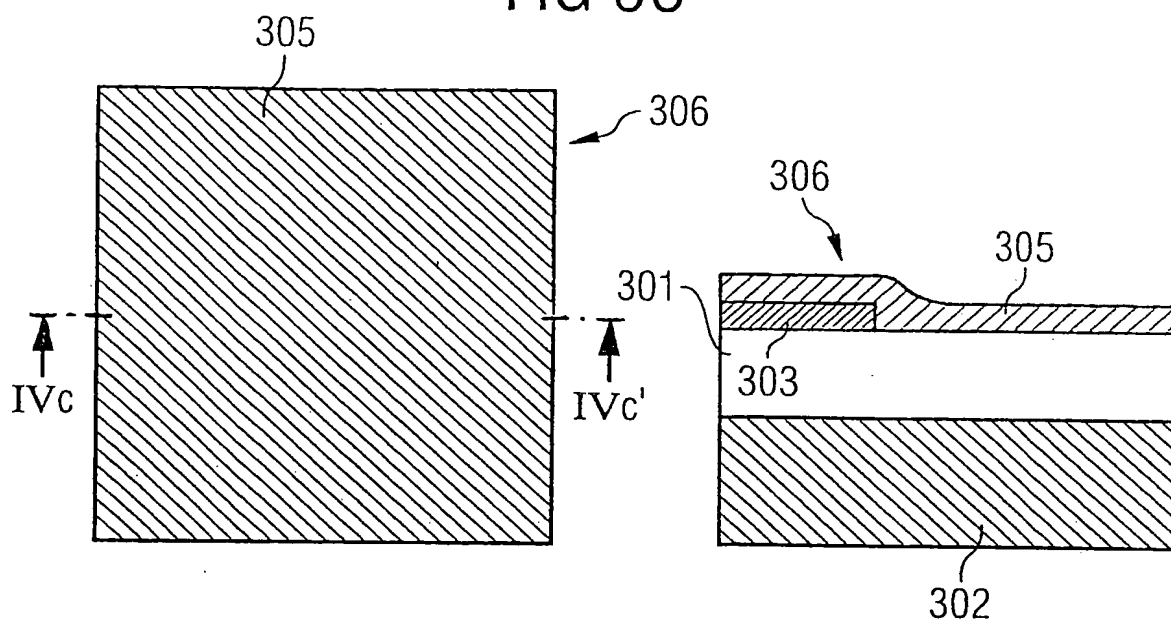
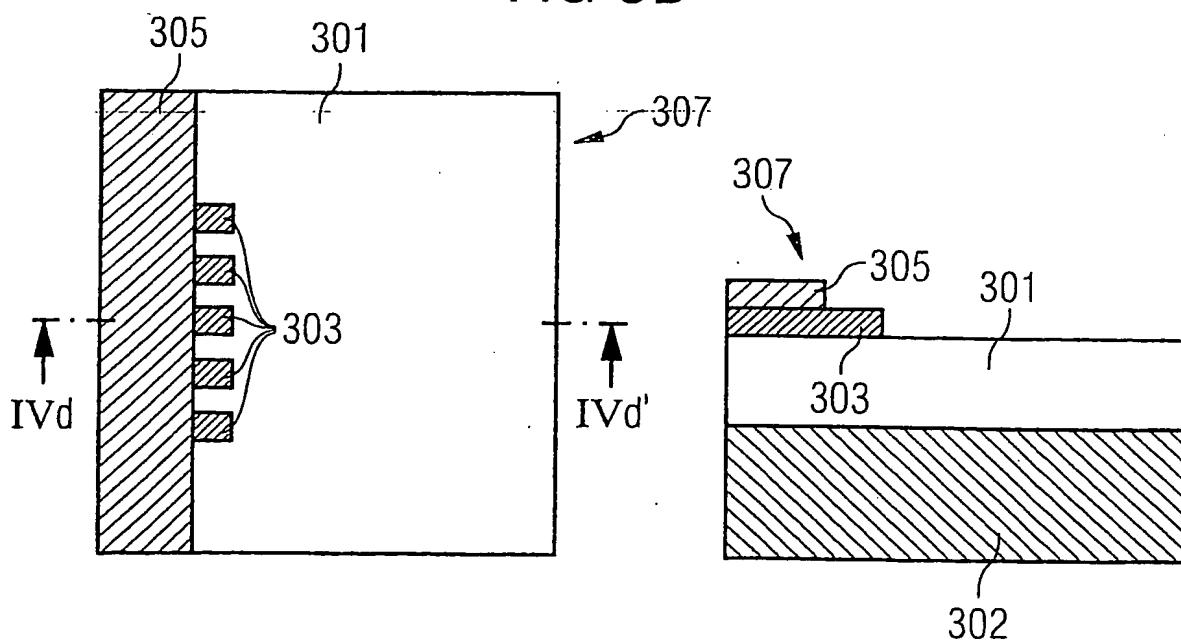


FIG 3D



5/10

FIG 3E

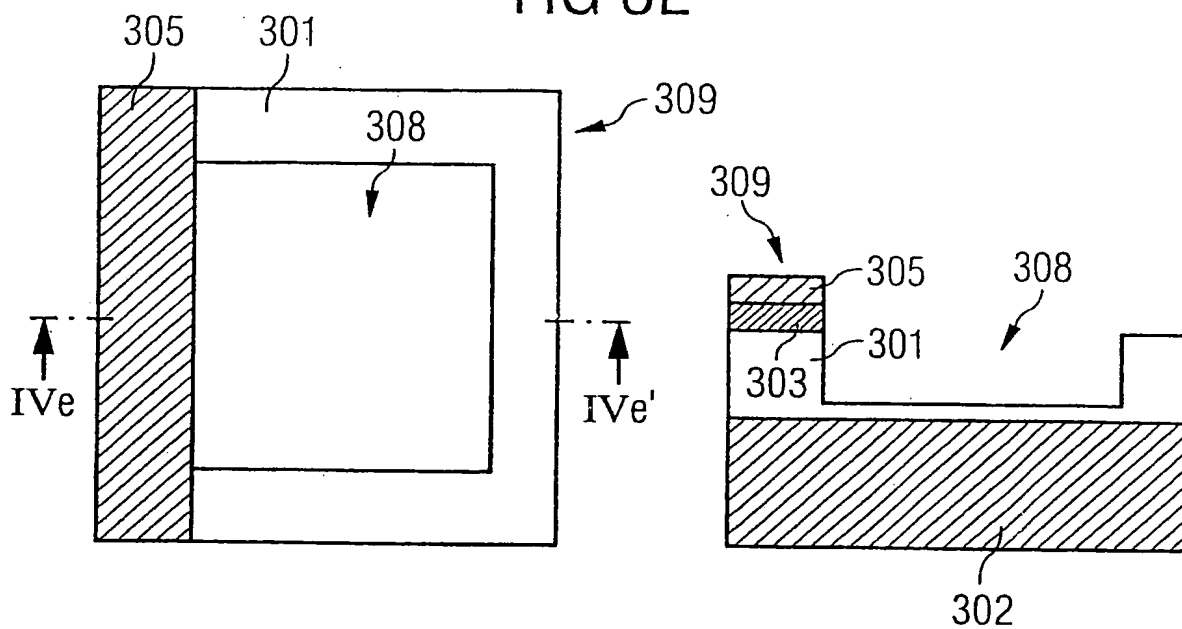
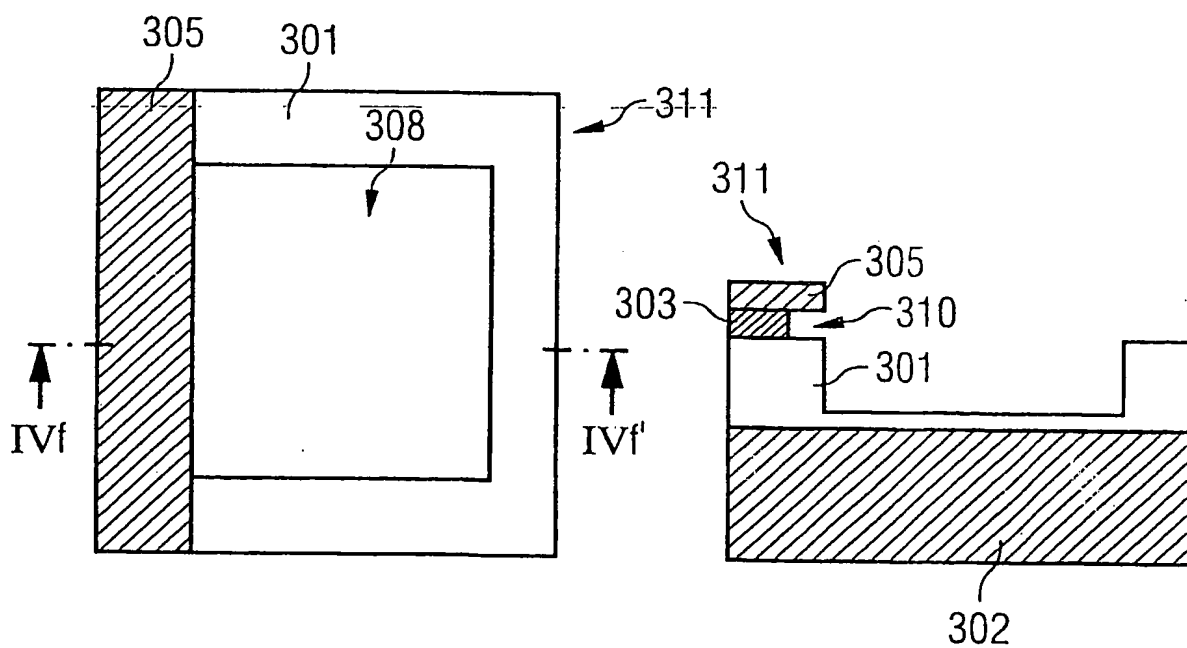


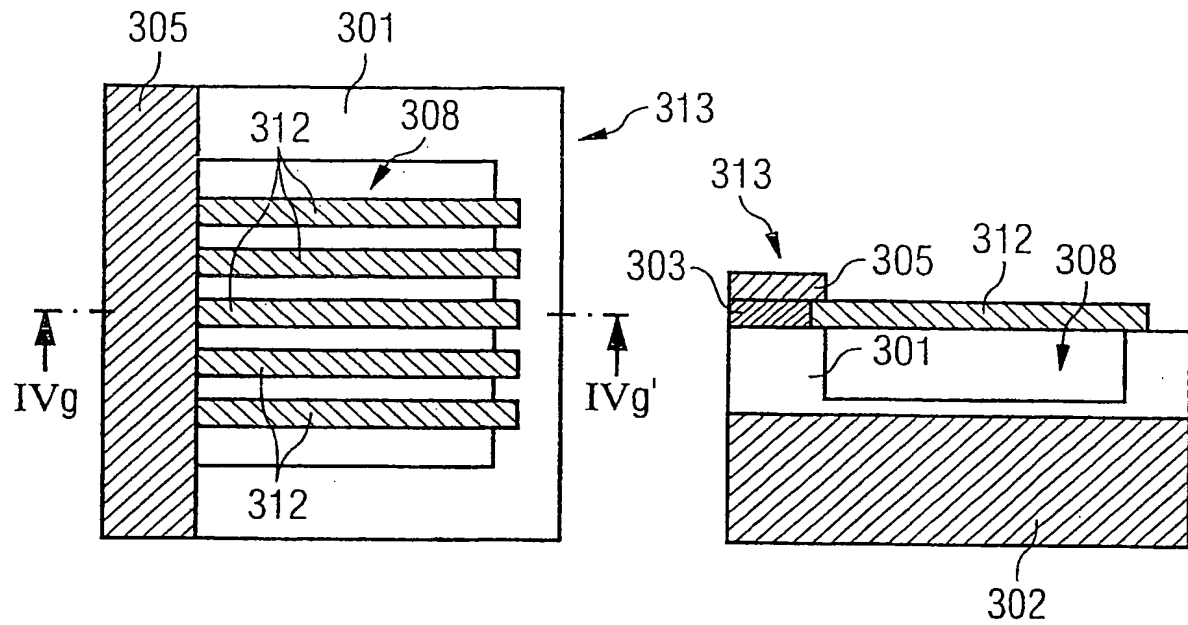
FIG 3F





6/10

FIG 3G



7/10

FIG 4A

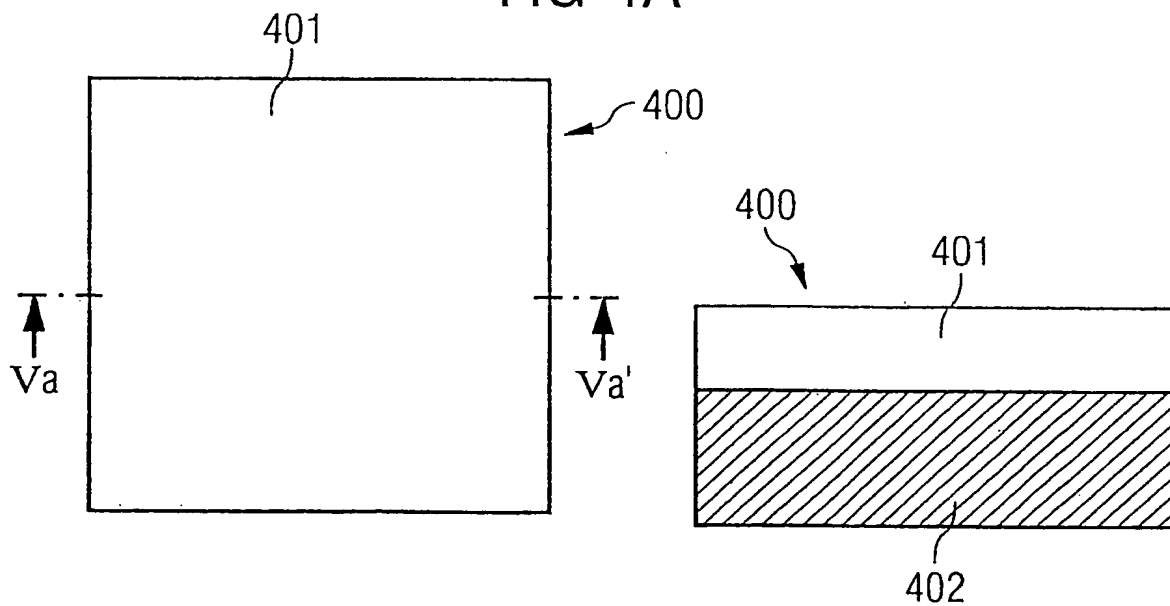
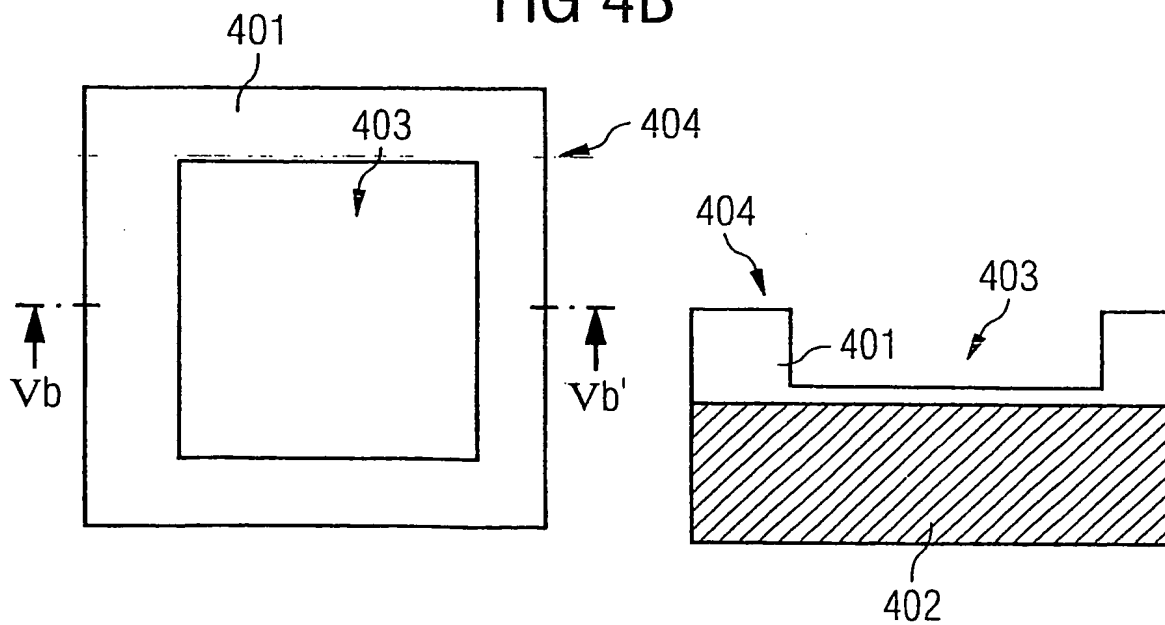


FIG 4B



8/10

FIG 4C

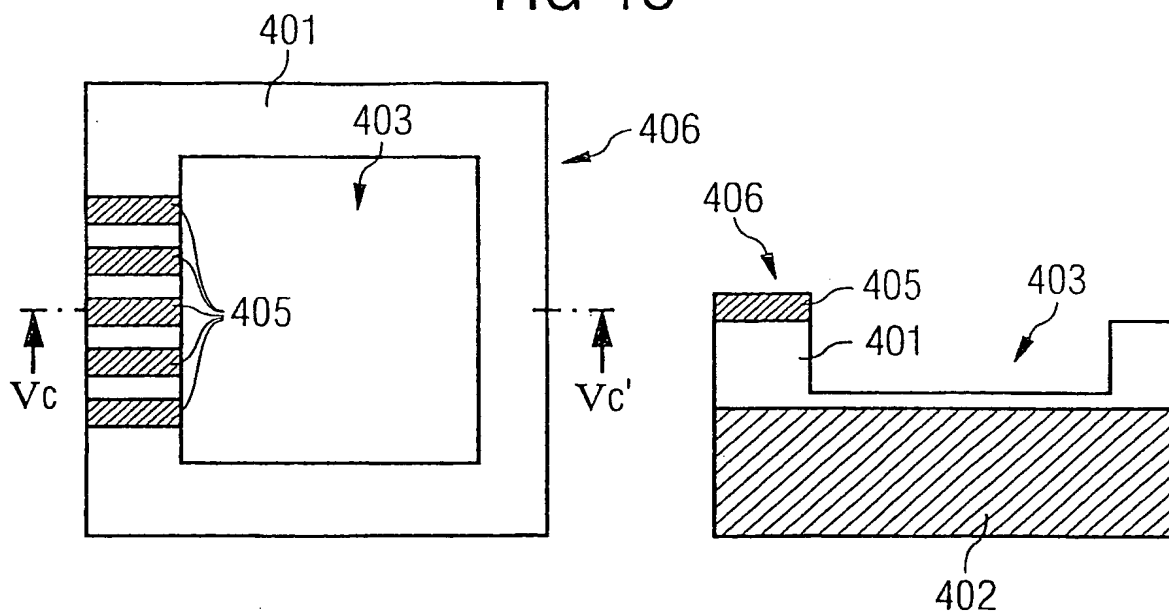
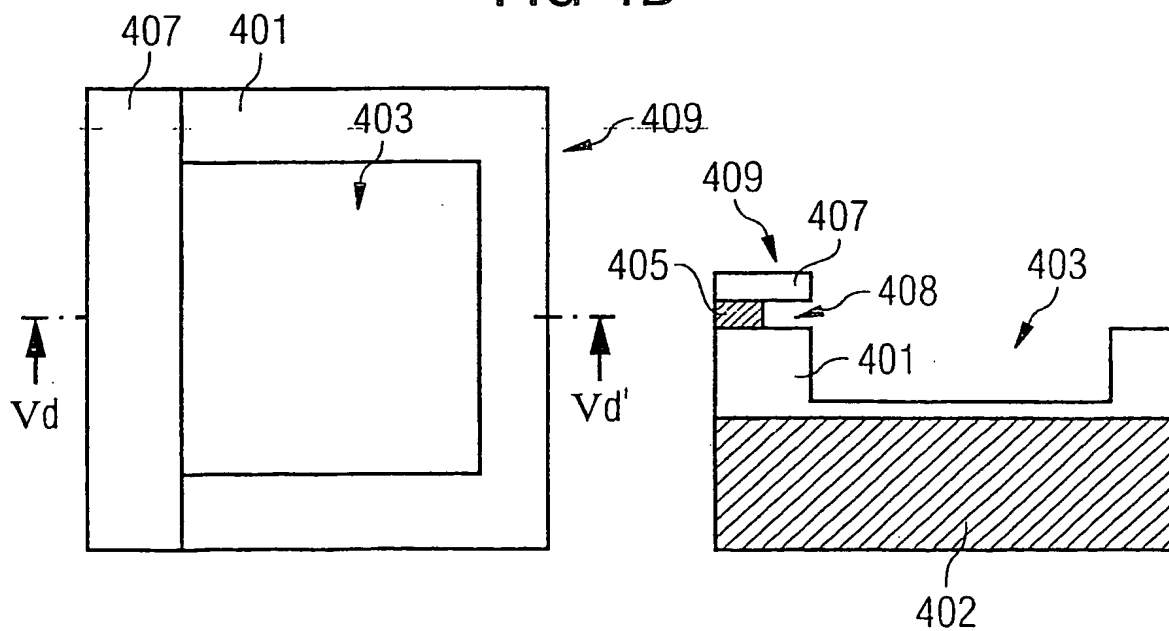


FIG 4D





10/10

FIG 5A

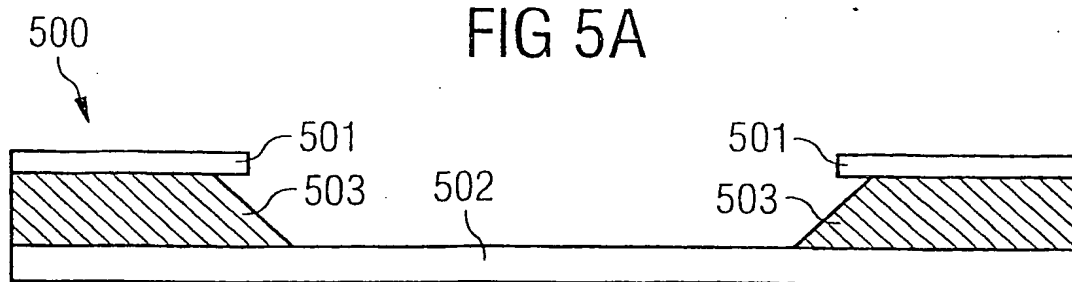


FIG 5B

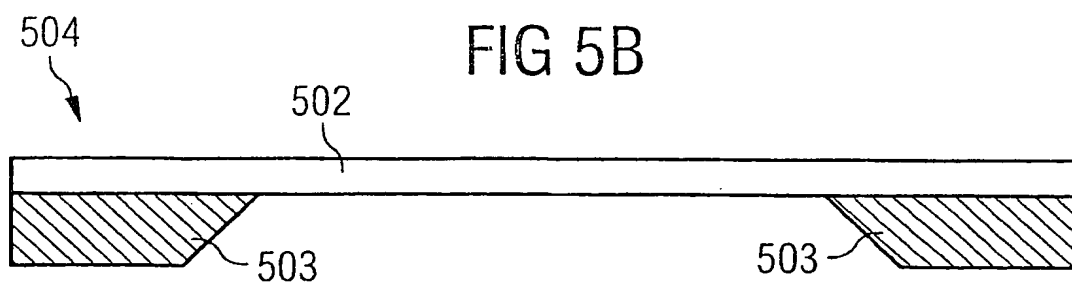


FIG 5C

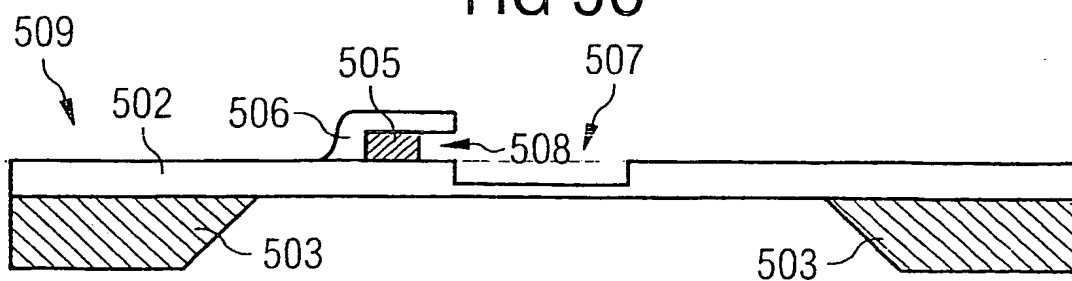
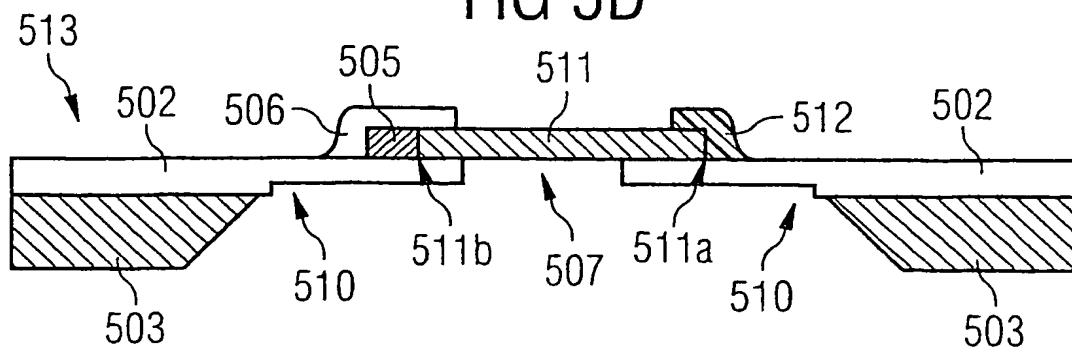


FIG 5D



(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES  
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
21. November 2002 (21.11.2002)

PCT

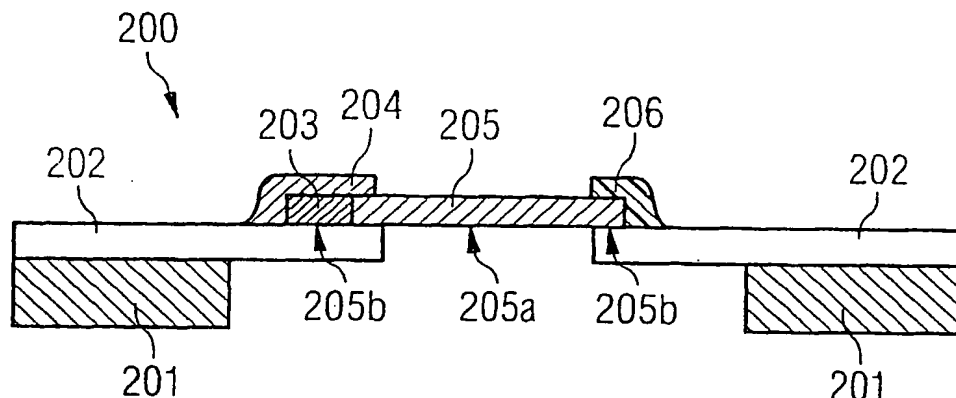
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 02/092505 A3**

- (51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: **C01B 31/02**,  
H01L 21/3205, G01N 27/12
- (72) Erfinder; und  
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **GRAHAM, Andrew**  
[GB/DE]; Gufidauner Strasse 6, 81547 München (DE).  
**HOFMANN, Franz** [DE/DE]; Herbergstrasse 25B,  
80995 München (DE). **KRETZ, Johannes** [DE/DE];  
Tattenbachstrasse 1, 80538 München (DE). **KREUPL,**  
**Franz** [DE/DE]; Mandlstrasse 24, 80802 München (DE).  
**LUYKEN, Richard, Johannes** [DE/DE]; Böcklerweg 28,  
81825 München (DE). **RÖSNER, Wolfgang** [DE/DE];  
Sudetenstrasse 23, 85521 Ottobrunn (DE).
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP02/05433
- (22) Internationales Anmeldedatum:  
16. Mai 2002 (16.05.2002)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität:  
101 23 876.2 16. Mai 2001 (16.05.2001) DE
- (74) Anwalt: **VIERING, JENTSCHURA & PARTNER;**  
Steindorfstrasse 6, 80538 München (DE).
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von  
US): **INFINEON TECHNOLOGIES AG** [DE/DE]; St.-  
Martin-Strasse 53, 81669 München (DE).
- (81) Bestimmungsstaaten (national): JP, US.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: NANOTUBE ARRAY AND METHOD FOR PRODUCING A NANOTUBE ARRAY

(54) Bezeichnung: NANORÖHREN-ANORDNUNG UND VERFAHREN ZUM HERSTELLEN EINER NANORÖHREN-AN-  
ORDNUNG



(57) Abstract: The invention relates to a nanotube array, comprising a substrate, a catalyst layer having one or more partial areas on the surface of the substrate and at least one nanotube parallel to the surface of the substrate on the surface of the catalyst layer. The nanotube array also has an electrically insulating layer between the substrate and the nanotubes and a topography such that the end segments of the at least one nanotube rest on the electrically insulating layer while its central segment rests freely. The invention also relates to a method for the production of said nanotube array.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Nanoröhren-Anordnung mit einem Substrat, einer Katalysatorschicht, die einen oder mehrere Teilbereiche aufweist, auf der Oberfläche des Substrats sowie mindestens einer parallel zur Oberfläche des Substrats auf der Oberfläche der Katalysatorschicht angeordneten Nanoröhre. Die Nanoröhren-Anordnung weist ferner eine elektrisch isolierende Schicht zwischen dem Substrat und den Nanoröhren mit einer derartigen Topographie auf, dass die mindestens eine Nanoröhre in ihren Endabschnitten auf der elektrisch isolierenden Schicht aufliegt und in ihren Mittenabschnitt frei liegt. Die Erfindung betrifft ferner ein Verfahren zum Herstellen einer Nanoröhren-Anordnung.

WO 02/092505 A3



(84) **Bestimmungsstaaten** (*regional*): europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR).

**Veröffentlicht:**

— mit internationalem Recherchenbericht

(88) **Veröffentlichungsdatum des internationalen  
Recherchenberichts:**

27. Februar 2003

*Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen  
Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on  
Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe  
der PCT-Gazette verwiesen.*

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP 02/05433

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
 IPC 7 C01B31/02 H01L21/3205 G01N27/12

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 7 G01N C01B H01L

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

WPI Data, PAJ, INSPEC, COMPENDEX, CHEM ABS Data, EPO-Internal

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
P,X	US 2002/014667 A1 (HAN YOUNG SOO ET AL) 7 February 2002 (2002-02-07)	1,2,4, 6-8,11, 12, 15-18, 24,26,27
P,A	the whole document	19-22
P,A	WO 01 44796 A (UNIV LELAND STANFORD JUNIOR) 21 June 2001 (2001-06-21)	1,4, 11-16, 26-29
	the whole document	
	---	
	--- -/-	



Further documents are listed in the continuation of box C.



Patent family members are listed in annex.

## \* Special categories of cited documents:

- \*A\* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- \*E\* earlier document but published on or after the international filing date
- \*L\* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- \*O\* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- \*P\* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

- \*T\* later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
- \*X\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
- \*Y\* document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.
- \*&\* document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

21 November 2002

Date of mailing of the international search report

28/11/2002

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2  
 NL - 2280 HV Rijswijk  
 Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
 Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Rigondaud, B



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP 02/05433

## C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	KONG J ET AL: "SYNTHESIS OF INDIVIDUAL SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBES ON PATTERNED SILICON WAFERS" NATURE, MACMILLAN JOURNALS LTD. LONDON, GB, vol. 395, 29 October 1998 (1998-10-29), pages 878-881, XP000960753 ISSN: 0028-0836 the whole document ---	1, 16
A	LI J ET AL: "HIGHLY-ORDERED CARBON NANOTUBE ARRAYS FOR ELECTRONICS APPLICATIONS" APPLIED PHYSICS LETTERS, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. NEW YORK, US, vol. 75, no. 3, 19 July 1999 (1999-07-19), pages 367-369, XP000850812 ISSN: 0003-6951 -----	

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/EP 02/05433

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2002014667	A1	07-02-2002	CN 1334234 A	06-02-2002
			DE 10134866 A1	04-04-2002
			GB 2364933 A	13-02-2002
			JP 2002118248 A	19-04-2002
WO 0144796	A	21-06-2001	EP 1247089 A1	09-10-2002
			WO 0144796 A1	21-06-2001

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES  
 IPK 7 C01B31/02 H01L21/3205 G01N27/12

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)  
 IPK 7 G01N C01B H01L

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

WPI Data, PAJ, INSPEC, COMPENDEX, CHEM ABS Data, EPO-Internal

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
P,X	US 2002/014667 A1 (HAN YOUNG SOO ET AL) 7. Februar 2002 (2002-02-07)	1,2,4, 6-8,11; 12, 15-18, 24,26,27
P,A	das ganze Dokument	19-22
P,A	WO 01 44796 A (UNIV LELAND STANFORD JUNIOR) 21. Juni 2001 (2001-06-21)	1,4, 11-16, 26-29
	das ganze Dokument	



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

\* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

- \*A\* Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
- \*E\* älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
- \*L\* Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
- \*O\* Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
- \*P\* Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

\*F\* Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

\*X\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

\*Y\* Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

\*G\* Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

21. November 2002

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

28/11/2002

Name und Postanschrift der internationalen Recherchenbehörde  
 Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2  
 NL - 2280 HV Rijswijk  
 Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,  
 Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Rigondaud, B

## C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	KONG J ET AL: "SYNTHESIS OF INDIVIDUAL SINGLE-WALLED CARBON NANOTUBES ON PATTERNED SILICON WAFERS" NATURE, MACMILLAN JOURNALS LTD. LONDON, GB, Bd. 395, 29. Oktober 1998 (1998-10-29), Seiten 878-881, XP000960753 ISSN: 0028-0836 das ganze Dokument ----	1,16
A	LI J ET AL: "HIGHLY-ORDERED CARBON NANOTUBE ARRAYS FOR ELECTRONICS APPLICATIONS" APPLIED PHYSICS LETTERS, AMERICAN INSTITUTE OF PHYSICS. NEW YORK, US, Bd. 75, Nr. 3, 19. Juli 1999 (1999-07-19), Seiten 367-369, XP000850812 ISSN: 0003-6951 -----	

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP 02/05433

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2002014667    A1	07-02-2002	CN        1334234 A	06-02-2002
		DE        10134866 A1	04-04-2002
		GB        2364933 A	13-02-2002
		JP        2002118248 A	19-04-2002
<hr/>			
WO 0144796        A	21-06-2001	EP        1247089 A1	09-10-2002
		WO        0144796 A1	21-06-2001
<hr/>			